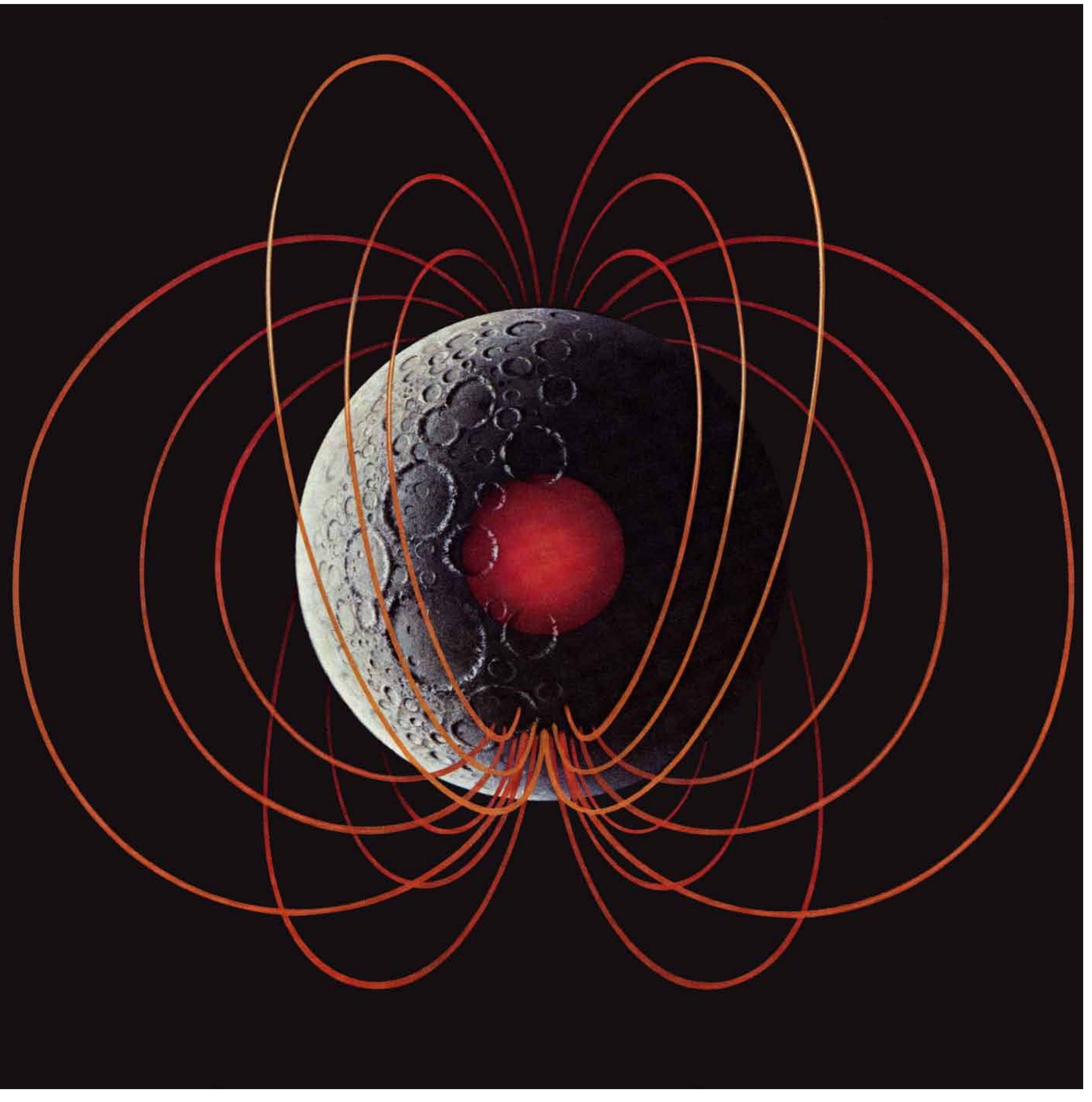
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN



CAMPOS MAGNETICOS LUNARES

Febrero 1988
450 Ptas.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 137
Febrero 1988

INVESTIGACION Y
CIENCIA
Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN

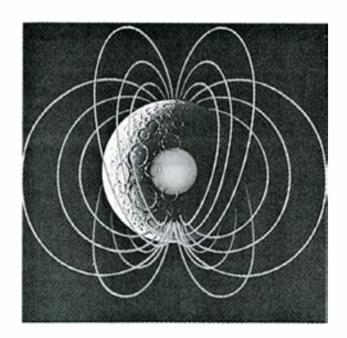
Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

Laureano Carbonell: *El H.M.S.* Warrior; Manuel Crespo: *Lagartijas unisexuales: un modelo de evolución cerebral*; Ramón Pascual: *Cuerdas cósmicas*; Luis Bou: *Computación conjunta en circuitos neuromorfos* y *Juegos de ordenador*; Manuel Puigcerver: *Paleomagnetismo lunar*; Juan L. Serra: *Movimiento de las células animales*; Juan-Pedro Adrados: *Fractura del vidrio*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio*.

Libros:

Luis Alonso, Eulogio Oset y Pere Molera



PORTADA

La portada ilustra las líneas magnéticas que podrían haber dimanado de la Luna hace unos 4000 millones de años (véase "Paleomagnetismo lunar", de S. K. Runcorn, en este mismo número). Las inspecciones magnéticas y los análisis de las rocas lunares dan pie para sostener que la Luna pudo tener un núcleo de hierro fundido que engendró un campo magnético. Los datos insinúan que, antaño, la Luna se desvió reiteradamente respecto de su eje de rotación por culpa, quizá, del impacto de satélites propios.

Suscripciones:
Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Precios de suscripción en pesetas:

	Un año	Dos años
España	4950	9000
Extranjero	5500	10.000

Ejemplares sueltos:
Ordinario: 450 pesetas
Extraordinario: 575 pesetas

- Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.
- En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.
- El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

Distribución para España:
MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid
Teléfono 652 42 00

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Teléfonos 409 70 45 - 409 70 46

Cataluña:
Paulino Muñoz Victoria
Muntaner, 467-469, 3.°, 3.ª
08021 Barcelona
Teléfono 211 92 45



Controlado por O.J.D.

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Pintura de la portada de George V. Kelvin

Página	Fuente	Página	Fuente
9	Cortesía de *The News*, Portsmouth, Inglaterra	54-55	Christopher T. Russell, Universidad de California en Los Angeles, y Laurence A. Soderblom, Servicio de Inspección Geológica de los Estados Unidos.
10-14	Hank Iken	56-62	George V. Kelvin
15	Cortesía de la Biblioteca pública de Newcastle, Inglaterra	65	Peter A. Lawrence, Laboratorio de Biología Molecular del Consejo de Investigaciones Médicas
17-21	J. M. Sancho y Magda Mària	66	Mark S. Bretscher
22	Frank Moss, Universidad de San Luis, Missouri	67	Tom Prentiss
25	P. J. De Vries	68-69	Nichol Thomson y Mark S. Bretscher
26	Enid Kotschnig	70	Tom Prentiss
27-29	Andrew Christie	73	Jon Brenneis
37	Quesada/Burke	74-78	Ian Worpole
38	Kitt Peak National Observatory	81	David Wiseman, Universidad de Western Ontario
40	François R. Bouchet, Universidad de California en Berkeley, y David P. Bennett, Fermi National Accelerator Laboratory y Universidad de Chicago	83	Edward Bell
41-42	George Retseck	87	E. E. Donaldson y T. Dickinson
45-50	Gabor Kiss	88	Michael Goodman
52	Melgar Photographers, Inc.		

ISSN 0210-136X — Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa, S.A.
Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por
Reprostudy, S.A.
Gráfica Elzeviriana, S.A.
Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11
08013 Barcelona
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

WALTER BROWNLEE ("El H. M. S. *Warrior*") es un historiador británico dedicado al *Warrior* en cuerpo y alma desde 1983. También es autor de un libro sobre ese buque, en cuya restauración intervino personalmente. Marino mercante de profesión, navegó en cargueros y petroleros por todo el mundo desde 1948, alcanzando el empleo de primer oficial y, en 1959, el de capitán. Dos años después cambió de profesión, para enseñar geografía e historia. Durante muchos años, Brownlee, que llegó a profesor titular en 1968 y a director de centro docente en 1973, ha sabido conjugar su capacidad didáctica con una gran afición por la historia de la marina, lo que le ha llevado a escribir libros y artículos que hacen de esa disciplina un deleite para los amantes e interesados en el tema.

JOSE MARIA SANCHO HERRERO ("Fluctuaciones en procesos naturales") es catedrático del departamento de estructura y constituyentes de la materia de la Universidad de Barcelona. En ese centro superior se doctoró en 1980. Se inició como investigador en el estudio del movimiento browniano y de las fluctuaciones en sistemas no markovianos que dio como resultado su tesis doctoral. Actualmente trabaja en el estudio dinámico de sistemas láseres sometidos a fluctuaciones, tanto de procedencia cuántica como las originadas por el propio montaje experimental.

DAVID CREWS ("Lagartijas unisexuales: un modelo de evolución del cerebro") es profesor de zoología y psicología de la Universidad de Texas en Austin. Licenciado en 1969 por la Universidad de Maryland en College Park, se doctoró en 1973 por la de Rutgers. Durante dos años investigó en la Universidad de California en Berkeley, trasladándose en 1975 a la de Harvard. El interés de su investigación se centra en la modulación hormonal de la diferenciación sexual y los factores que regulan, en la culebra de tirantes, la adaptación a hábitats extremos.

ALEXANDER VILENKIN ("Cuerdas cósmicas"), que ha enseñado física por la Universidad de Tufts desde 1983, ha dedicado estos últimos años a estudiar las cuerdas cósmicas y el problema de cómo se formó el universo a partir de la "nada". Nacido en la Unión Soviética, se licenció en 1971 en la Universidad estatal de Jarkov. Durante el lustro siguiente sirvió en el ejército, primero, y tuvo posteriormente varios empleos, aprovechando su tiempo libre para estudiar física. En 1976 se trasladó a los Estados Unidos y un año después se doctoró por la Universidad estatal de Nueva York en Buffalo. Alexander Vilenkin se incorporó a su plaza de Tufts después de realizar estudios de postdoctorado en la Universidad Case Western Reserve.

DAVID W. TANK y JOHN J. HOPFIELD ("Computación conjunta en circuitos neuromorfos") pertenecen a la plantilla técnica de los Laboratorios AT&T Bell. Tank cursó ciencias en la Universidad Case Western Reserve. Ingresó en los Laboratorios Bell en 1983, año en el que la Universidad de Cornell le concedió el doctorado. Hopfield ha pertenecido a los Laboratorios Bell desde 1973, y es titular de la cátedra Roscoe Gilkey Dickinson de química y biología, del Instituto de Tecnología de California. Se recibió de doctor en fisica por la Universidad de Cornell en 1958 y pasó dos años trabajando en los Laboratorios Bell antes de aceptar una plaza de físico investigador en la École Normale Supérieure. Regresó a los Estados Unidos, en 1961, para enseñar física en la Universidad de California en Berkeley; en 1964 lo contrató la Universidad de Princeton. Ocupa su cargo actual en el Instituto de Tecnología de California desde 1980.

S. K. RUNCORN ("Paleomagnetismo lunar") es decano de la facultad de ciencias físicas de la Universidad de Newcastle upon Tyne y catedrático desde 1956. Licenciado en en 1946 por el Gonville and Caius College de la Universidad de Cambridge, se recibió de doctor en física por la de Manchester en 1949.

MARK S. BRETSCHER ("Movimiento de las células animales") dirige la división de biología celular del laboratorio de Biología Molecular del Consejo de Investigaciones Médicas. Doctor por la Universidad de Cambridge (1965), ha sido profesor visitante de las universidades de Harvard (1974) y Stanford (1985). Este es el segundo artículo que publica Bretscher en *Investigación y Ciencia*; el primero, "Las moléculas de la membrana celular", apareció en diciembre de 1985.

TERRY A. MICHALSKE y BRUCE C. BUNKER ("Fractura del vidrio") han colaborado en el desarrollo de modelos sencillos para describir las reacciones moleculares que tienen lugar cuando se agrieta el vidrio. Michalske acaba de hacerse cargo de la dirección del departamento de ciencias de metales y cerámicas de los Laboratorios Battelle—Pacific Northwest. Doctor en ciencias de los materiales (1979) por la Universidad de Alfred, trabajó en la Oficina Nacional estadounidense de Pesos y Medidas hasta 1981, cuando entró a formar parte del cuerpo técnico de los Laboratorios Nacionales Sandia. Ha creado un material vitrocerámico que mejora la resistencia a la fractura y ha desarrollado una técnica de láser para la reparación de grietas en el vidrio. Bunker es miembro del cuerpo técnico de Sandia desde 1979, cuando defendió su doctorado en química inorgánica en la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign. Además de estudiar cómo se fractura el cristal, está desarrollando métodos químicos para la síntesis de cerámicas. Los proyectos de investigación de Bunker abarcan la síntesis química de semiconductores en altas temperaturas y películas de óxidos para dispositivos ópticos integrados.

Hace...

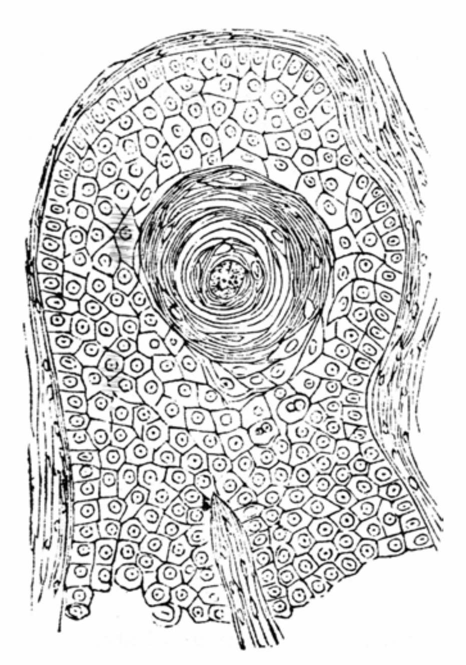
José M.ª López Piñero

...cien años

Eduardo García Solá publicó su *Tratado elemental de histología e histoquimia normales*.

Nacido en Málaga el año 1845, García Solá estudió medicina en la Universidad de Granada, donde tuvo entre sus maestros a Mariano López Mateos y Aureliano de San Juan, destacadas figuras de la historia de la histología en España, especialmente el segundo, que encabezó la institucionalización universitaria de la disciplina. En 1872 obtuvo la cátedra de patología general y anatomía patológica de la Facultad de Medicina granadina, que ocupó hasta su jubilación en 1919. Falleció en la misma Granada el año 1922.

García Solá fue una de las principales figuras de la histología y la histopatología españolas anteriores a Santiago Ramón y Cajal, así como uno de los más tempranos cultivadores de la moderna microbiología en nuestro país. Publicó, por una parte, una serie de excelentes síntesis y, por otra, medio centenar de artículos dedicados a exponer los resultados de sus trabajos de laboratorio.



1. *"Epitelioma de células pavimentosas", según García Solá (1874)*

Su *Tratado de patología general y Anatomía patológica*, a lo largo de cinco ediciones entre 1874 y 1907, acertó a integrar los enfoques de la histopatología y la fisiopatología con la orientación etiopatológica desarrollada en torno a la bacteriología. Su *Manual de microquimia clínica* (1876) fue uno de los más tempranos textos europeos consagrados a los análisis clínicos de laboratorio. En la monografía titulada *Examen crítico de las teorías histogénicas dominantes* (1882), García Solá expuso su actitud favorable a la teoría citogenética de Rudolf Virchow, matizada por los trabajos de Ernst Haeckel sobre el *Bathybius* y por las investigaciones microbiológicas. No se trata de una opinión libresca, ya que está basada en experimentos e indagaciones micrográficos propios. Algo parecido puede decirse de su *Tratado elemental de histología e histoquimia normales* (1888), fruto de una paciente y rigurosa labor de verificación en el laboratorio de su cátedra de Granada.

Entre los trabajos de García Solá como histopatólogo, destacan quizá los relativos a la lepra, que efectuó en relación con Benito Hernando. Como microbiólogo, su producción fue muy abundante a partir de 1878. Sobresalen su exposición, en fechas muy tempranas, de las condiciones para probar la acción patógena específica de un germen (1884), así como su estudio sobre la inmunidad natural (1888). Se ocupó ampliamente del vibrión colérico y de la bacteriología de la lepra. Fue autor de uno de los informes críticos sobre la vacunación anticolérica de Jaime Ferrán, en 1885, y consiguió una técnica para diferenciar, por su distinta reacción inmunitaria, la lepra lepromatosa de la tuberculoide (1981).

Como muestra de la producción de García Solá vamos a reproducir dos fragmentos, pertenecientes ambos al punto de partida de su obra, tal como se refleja en la primera edición de su *Tratado de patología general y Anatomía patológica*, publicado, como hemos dicho, en 1874.

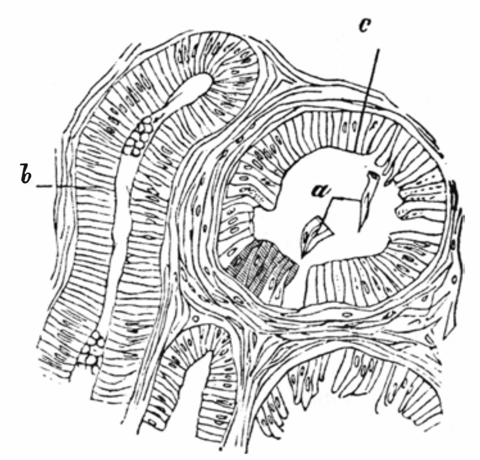
El primero de tales fragmentos se refiere a su concepción de la anatomía patológica y de la histopatología: "Anatomía patológica general *es la ciencia que se ocupa de las alteraciones materiales que el organismo presenta, considerándolas de un modo abstracto, o sea independientemente del tejido y del órgano afectos*. Anatomía patológica especial *es la ciencia que estudia estas mismas alteraciones en cada uno de los tejidos y órganos de la economía*. Véase, pues, cómo no puede ser paralela, según se cree por la mayoría de autores, la división de las anatomías patológica y normal; toda vez que, conservando esta última la división inmortalizada por el genio del gran Bichat, considera bajo el epígrafe de anatomía general los elementos que son comunes a varios órganos, o sea los tejidos, cuya palabra vale tanto como decir, *partes similares* y que se encuentran no obstante en diversos puntos del cuerpo; estudiando con el nombre de anatomía especial o descriptiva las particularidades referentes a cada uno de los órganos. De consiguiente, la anatomía morbosa general no tiene equivalente en la anatomía normal, y las dos subdivisiones de esta última corresponden con toda exactitud a la anatomía patológica especial.

"Una vez dividida la Anatomía patológica en las dos grandes ramas que quedan señaladas, natural y lógico es que procedamos a subdividir la segunda de ellas, teniendo en cuenta el distinto material de estudio que forma su objeto. Ocupándose esta ciencia de las alteraciones materiales, sobrevenidas en los tejidos y en los órganos, surge desde luego su división en Anatomía patológica especial de cada tejido, y Anatomía patológica especial de cada órgano. La primera se conoce más generalmente con el nombre de Histología patológica, y la segunda ha sido denominada, aunque con cierta vaguedad, por Houel con el epíteto de topográfica. Con este motivo, advertiremos que autores tan recomendables como Cornil y Rindfleisch, comprenden bajo el título de Histología patológica lo que en realidad abraza mucho

más que el estudio de las lesiones en los tejidos, pues ambos estudian en sus respectivas obras, no sólo las lesiones en abstracto, como preámbulo de sus trabajos, sino que descienden a la descripción de las alteraciones materiales ocurridas en cada uno de los órganos, materia esta última que corresponde, según hemos visto, a la Anatomía patológica topográfica. Importa, pues, precisar el sentido de estas voces, no dando a la palabra Histología la acepción tan alta que se le concede por casi todos los autores; y ya que sobre este particular ha insistido muy especialmente nuestro antiguo y distinguido catedrático don Aureliano Maestre de San Juan, refiriéndose a la Histología normal, tenemos una verdadera satisfacción en imitarle, reclamando para la Histología patológica igual precisión en el lenguaje.

"Se acostumbra designar con el nombre de Microscopía patológica la ciencia que se ocupa de las alteraciones morbosas que sólo pueden descubrirse con ayuda de microscopio; pero si bien se mira, esta rama de los conocimientos médicos no viene a ser otra cosa que una parte de la Anatomía patológica, pues, ocupándose ésta de las lesiones materiales, claro es que deberá considerar el objeto de su estudio, no sólo bajo el punto de vista de los caracteres apreciables simplemente por los sentidos, sino que deberá examinarlo además en cuantas particularidades se revelen por medio del microscopio, cuyo instrumento puede considerarse tan sólo como un poderoso auxiliar de las exploraciones anatomo-patológicas. Otro tanto debe decirse de la Química patológica, ciencia todavía naciente y que, sin embargo, ha ilustrado ya varias cuestiones de Anatomía morbosa. Es cierto que la enfermedad coincide algunas veces con modificaciones en la composición íntima de los órganos; mas semejantes hechos, ni se han sistematizado, ni nos es posible asignarles en muchos casos su verdadera significación, por lo cual, la Química patológica, aunque se juzgue con mayor o menor fundamento que le pertenece el porvenir, constituye únicamente en la actualidad un medio auxiliar, con el que se perciben alteraciones sustanciales tan delicadas, que ni aun el microscopio hubiera podido descubrir...".

El segundo fragmento corresponde a su estudio histopatológico del epitelioma: "El *epitelioma*, o *cancroide* es un neoplasma formado, casi exclusivamente, por células epiteliales que han adquirido la plenitud del desarrollo. La



2. "Epitelioma de células cilíndricas", según García Solá (1874)

definición que antecede encierra, no sólo la característica del tumor epitelial, sino que comprende las diferencias que lo separan del carcinoma. Este último consta de células epiteliales, separadas por un estroma conectivo; por el contrario, el cancroide, o no contiene más que células, o si existe en su masa alguna cantidad de tejido conjuntivo, es en tan mínima proporción que representa un elemento sucedáneo del tumor. Además las células del carcinoma suelen no estar completamente desarrolladas, pues con frecuencia aparecen como elementos epiteliales embrionarios; y a la inversa, en el epitelioma las células son adultas, han alcanzado todo su desarrollo, como lo prueba la circunstancia de poseer una verdadera membrana cubierta. Prescindiendo de estas diferencias, el cáncer tiene de común con el cacroide su origen puramente epitelial.

"El epitelioma reproduce las dos principales variedades que presenta el epitelium fisiológico; hallándose unas veces constituido por *células pavimentosas*, y otras por *células cilíndricas*.

"El *epitelioma de células pavimentosas* es un tumor compacto, duro, poco jugoso, blanquecino, y se desarrolla casi siempre sobre la piel, bajo la forma de una induración aplastada en forma de chapa. Al crecer, lo hace profundizando en los tejidos, siendo muy raro que se eleve en superficie. Cuando llega al máximum de su desarrollo, se ulcera por medio de pequeñas erosiones, que se unen para engendrar una úlcera mamelonada, de la cual fluye el líquido purulento, mezclado con ciertos grumos, como ateromatosas. El fondo de esta úlcera se encuentra siempre indurado, y sus bordes son callosos. Raspando, con un escalpelo, la superficie

MANUAL

DE

MICROQUIMIA CLÍNICA

ó

DIAGNÓSTICO MÉDICO

FUNDADO EN LAS EXPLORACIONES MICROQUÍMICAS

POR EL DOCTOR

EDUARDO GARCÍA SOLÁ

Catedrático de Patología general, por oposicion, en la Universidad de Granada; antiguo Alumno interno, por oposicion, y ex-Ayudante de clases prácticas de la Facultad de Medicina de Granada; Bachiller y Licenciado, por oposicion, en Medicina y Cirujía; ex-Oficial médico del Cuerpo de Sanidad militar, por oposicion; ex-Profesor de número del Hospital General de Madrid, por oposicion; Sócio de varias corporaciones científicas, etc.

OBRA ILUSTRADA CON 59 GRABADOS.



MADRID.
MOYA Y PLAZA, LIBREROS EDITORES.
Calle de Carretas, número 8.
1876.



3. Portada del Manual de microquimia clínica *(1876), de García Solá, uno de los más tempranos textos europeos consagrados a los análisis clínicos de laboratorio*

de los cortes, hechos sobre el tumor, obtenemos muchos grumos opacos, que no son miscibles con el agua.

"La *investigación microscópica*, puede practicarse, o aislando con una aguja de catarata los elementos celulares del cancroide, o haciendo cortes delgados, que no sólo permiten descubrir los caracteres de las células, sino que ponen de manifiesto su asociación al constituir el neoplasma. Ocupémonos primero de las células, y examinemos después esta última asociación.

"Las *células* del cancroide pavimentoso corresponden siempre al tipo epitelial (epidermis, epitelium mucoso), pero circunstancias accidentales, ligadas a su desenvolvimiento y a su asociación, hacen que se las observe bajo las formas más variadas. Unas son completamente esféricas, otras poligonales, algunas fusiformes, habiéndolas además ovóideas, aplastadas en forma de lámina, dentelladas, etc. Por lo común, sólo contienen un núcleo, provisto de su correspondiente nucleola granular. Las células polinucleares suelen ser las más pequeñas. Cuando los elementos nucleares tienen la forma de láminas, es decir, cuando son aplastados, suelen aplicarse los unos sobre los otros, a la manera de las capas de una cebolla, de lo cual resultan unos cuerpos redondeados, u ovales, apreciables en ciertos casos a simple vista, y que se denominan *globos epidérmicos*.

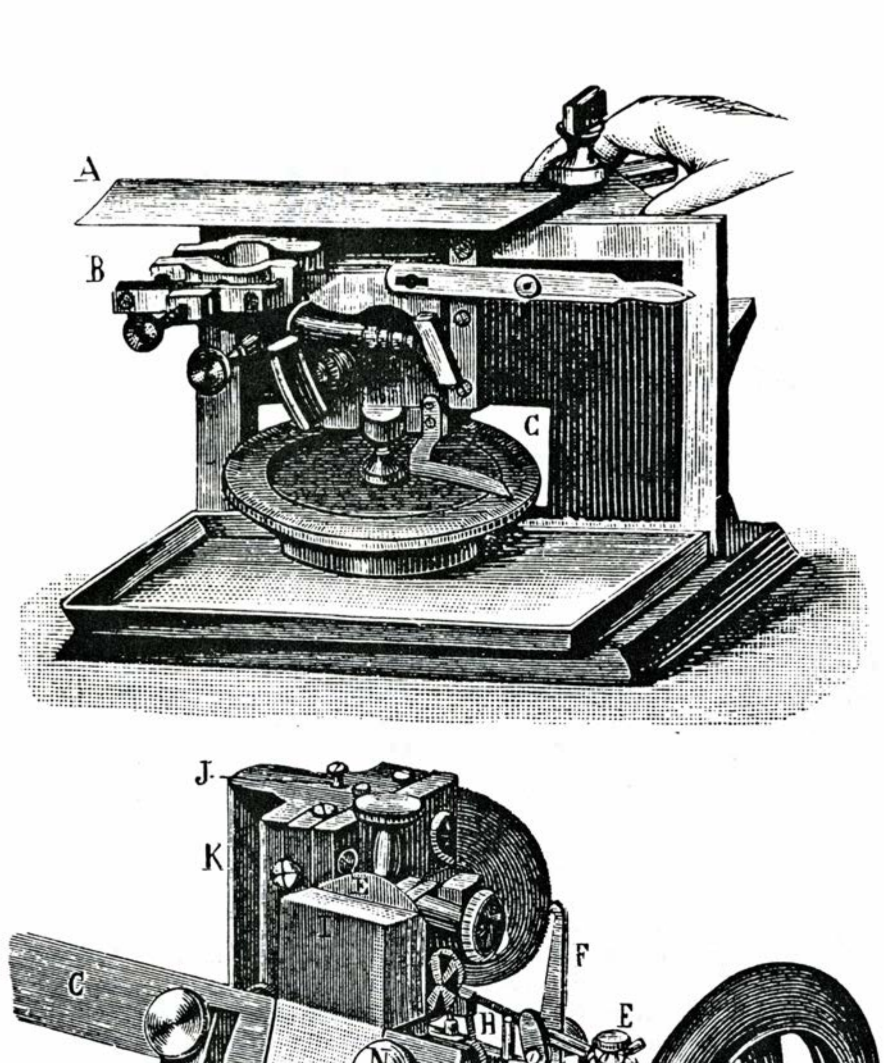
"Reconociendo un *corte del tumor*, observamos que éste se halla formado por una serie de *lóbulos*, en cada uno de los cuales (figura 1) se descubren las notabilísimas particularidades siguientes: la periferia del lóbulo se halla compuesta por una línea de células cilíndricas, implantadas perpendicularmente a la dirección de la cavidad donde se aloja dicho lóbulo cancróideo: más adentro de esta fila de células cilíndricas, aparecen otras poligonales: en una zona más interna las células se van aplastando, y algunas toman un aspecto fusiforme; por último, en el centro del lóbulo, ha llegado a tal punto el aplanamiento de las células que, transformándose ellas en verdaderas láminas y cubriéndose recíprocamente las unas a las otras, forman un verdadero globo epidérmico, que ocupa el centro del lóbulo, según puede verse en la figura 1. Esta disposición es análoga a la que presenta el epidermis; en efecto, las capas más profundas de esta membrana se hallan compuestas por células cilíndricas o esféricas; después, las células se van aplastando, y cuando examinamos una capa más superficial, ya son poligonales o fusiformes; hasta que por fin, el aplanamiento llega a su máximum, y las que ocupan la superficie quedan reducidas a simples laminillas (*laminillas epidérmicas*).

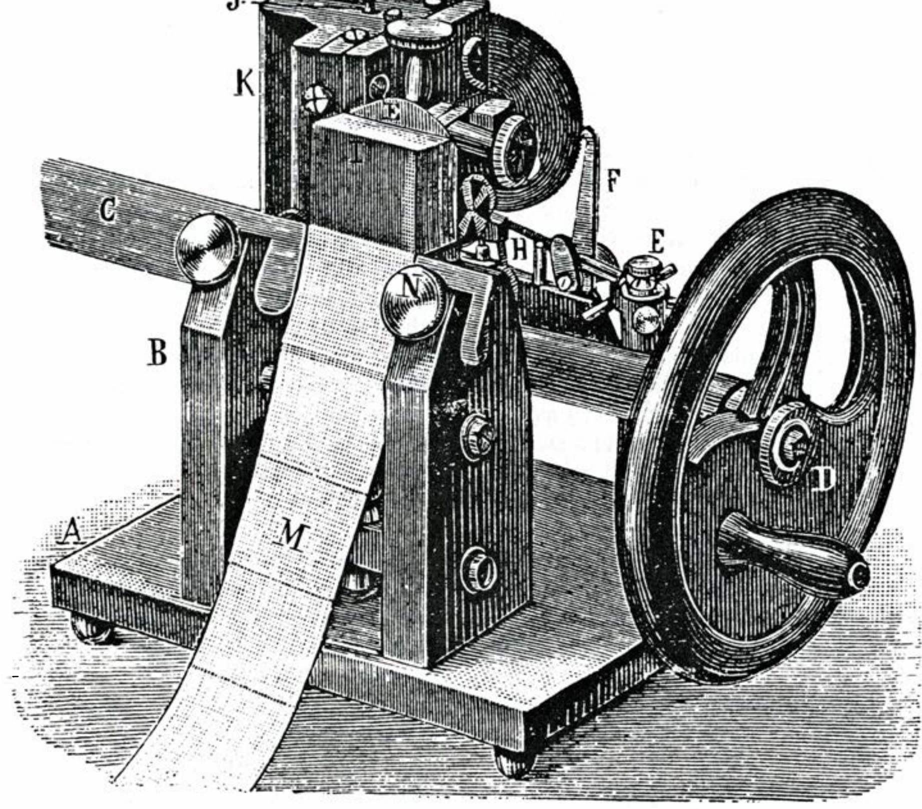
"El *epitelioma de células cilíndricas* es una variedad que se desarrolla especialmente en las mucosas cubiertas por un epitelium cilíndrico, como lo es la del intestino, del estómago, del útero, de los conductos biliares, etc. Es muy raro observarla en el ovario, y con menos frecuencia todavía se la encuentra en la piel. El neoplasma es blando, pequeño, redondeado, muchas veces poliposo (sobre todo cuando recae en el útero). A menudo se ulcera por su centro, engendrando una supuración más clara y abundante que la del cancroide pavimentoso. Comprimidas ligeramente las superficies de sección del tumor, dan un jugo lechoso que pre-

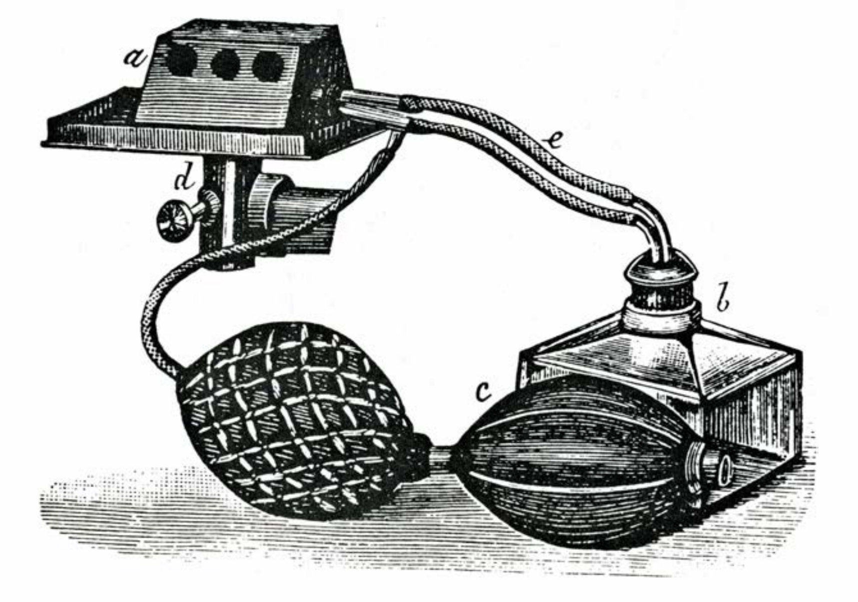
senta en suspensión varios glomérulos amarillentos.

"Sometiendo este jugo a la *investigación microscópica*, reconocemos que consta de numerosas células, cuyos caracteres ofrecen la mayor diversidad. Unas son cilindro-cónicas (figura 2 a); otras cilíndricas (figura 2 b y c), fusiformes o poligonales; algunas presentan una dilatación ampulosa en cualquiera de sus extremidades; cierto número de ellas, sobre todo las más voluminosas, se encuentran rodeadas por un doble contorno; su longitud varía de 0^{mm}, a 0^{mm},040; por último, poseen uno o muchos núcleos ovales, que miden de largo unas 0^{mm},010, y que contienen uno o varios núcleos brillantes. Semejante polimorfia celular no ofrece, como se ve, nada de característico; pero a veces encontramos varias células cilíndricas, reunidas por sus caras laterales, y presentando extremidades en la misma línea; lo cual es ya importante, porque estos conjuntos celulares sólo se observan en el tumor que estudiamos.

"Sin embargo, la característica del epitelioma cilíndrico, lo que le tipifica en todos los casos, y lo que nos conduce desde luego a su diagnóstico anatómico, es el aspecto que presentan sus cortes, previamente endurecidos a beneficio del alcohol. El examen de las piezas endurecidas, nos permite descubrir, que el tumor consta de muchos *tubos circunscritos por una línea compacta de células epiteliales cilíndricas.* Al practicar los cortes para la preparación de la pieza, unos tubos fueron seccionados en el sentido de su longitud (figura 2 b), al paso que otros fueron seccionados trasversalmente (figura 2 c); los primeros se presentan bajo el aspecto de una estrecha cavidad longitudinal, limitada por una fila de células cilíndricas; los segundos, ofrecen una cavidad en su centro, y alrededor una serie de células igualmente cilíndricas. Entre los tubos hay un estroma delicado, compuesto de tejido conectivo laxo, o fibroso".







4-6. Para la redacción de su Tratado elemental de histología e histoquimia normales *(1888), García Solá desarrolló un paciente y riguroso trabajo de verificación en el laboratorio con el mejor instrumental de la época. Entre este último se encontraba el microtomo automático de Minot (fig. 4), el microtomo de Schanze (fig. 5) y su aparato de congelación (fig. 6)*

El H. M. S. *Warrior*

Restaurado recientemente, tras un siglo largo de abandono, el H. M. S. Warrior *fue el primer buque de guerra con casco y coraza de hierro. En su día hizo el papel de disuasor y fue el origen de una verdadera carrera de armamentos*

Walter Brownlee

El *Victory* es un navío muy famoso. Toda la gloria le viene de haber sido el buque insignia del vicealmirante Nelson, cuando, a bordo, y al mando de la Flota Real Británica, derrotó a la escuadra hispano-francesa en la batalla de Trafalgar, en 1805. Actualmente, se conserva en la base naval de Portsmouth, en Inglaterra, donde constituye un recuerdo y monumento de aquella victoria británica y del propio Nelson, caído en el combate. Recientemente, se ha restaurado otra nave británica, culminando así el proyecto más caro y ambicioso de cuantos se han llevado a la práctica hasta el momento. Su destino final es el de quedar amarrada también, de forma permanente, en Portsmouth, no muy lejos de donde se encuentra el *Victory*. El buque en sí no luce ninguna cicatriz de guerra ni las cubiertas del mismo se tiñeron jamás con la sangre de sus héroes. Tampoco disparó nunca ningún cañonazo de agresión. Sin embargo, tiene méritos suficientes para ocupar ese lugar de honor, junto al *Victory*.

Lleva por nombre *Warrior* y es el único buque de guerra de la era victoriana que ha sobrevivido hasta hoy. Sin embargo, no es precisamente éste el motivo de su entrada en la historia naval. La incidencia del *Warrior* procede de su misma aparición: su construcción hizo cambiar el proyecto de todos los buques de guerra del mundo. El H.M.S. *Warrior* fue el primer navío con casco y coraza de hierro que existió.

En su día, el *Warrior* destacaba tanto sobre los demás buques de guerra existentes, que ninguno le disputó jamás la supremacía por la fuerza. Por eso no tuvo nunca la oportunidad de distinguirse en combate, ni necesitó que sus tripulantes dieran la vida por él. Una década después de la botadura, el *Warrior* pasó a la situación de retiro permanente, al quedar anticuado como consecuencia de las mejoras introducidas por otras potencias en la construcción naval, mientras el gran público se olvidaba rápidamente de él.

Aunque parezca una ironía, el papel del *Warrior* se aprecia mucho mejor ahora, en un mundo con más de cuarenta años de experiencia en armas nucleares, que en plena época victoriana. El *Warrior* fue, de hecho, un elemento de disuasión. Apareció, en 1860, como una máquina de guerra terrible, que dejó anticuados a todos los navíos existentes, desalentando al mismo tiempo a cualquier posible enemigo. De todos modos, al igual que ocurre siempre con los progresos de tipo tecnológico, ni podía quedar por inventar, ni pudo evitar que otros lo imitaran. Gracias a él podemos presentar ahora el mundo victoriano bajo un aspecto apenas conocido en su día, pero que en nuestra época es muy familiar: el de la carrera de armamentos.

Durante los siglos XVIII y XIX varios países se enfrentaron entre sí para abrir y proteger las rutas comerciales a través de los océanos, aunque con anterioridad a 1840 todos lo hacían utilizando los mismos medios: buques de guerra de madera, propulsados por el viento. La madera era el material de construcción más común y adecuado. La experiencia acumulada durante miles de años había desarrollado una industria capaz de producir naves susceptibles de desenvolverse en cualesquiera condiciones de tiempo, salvo en las más adversas. Además, es preciso tener en cuenta que bastaba enviar una patrulla a tierra para poder obtener, por compra, préstamo o robo, la pieza de madera adecuada para efectuar la reparación o sustitución de cualquier elemento de la estructura de a bordo. El trabajo en sí corría a cargo del equipo de carpinteros de ribera de la dotación. El viento, como es natural, soplaba en todos sitios y lo hacía de forma gratuita. Los palos, muy altos y generalmente en número de tres, llevaban un conjunto de velas, vergas y jarcias que, aun siendo muy complicado, podía manejarse con facilidad hasta conseguir que el buque navegara al rumbo ordenado por el capitán o el comandante, si se trataba de un buque de guerra. Sólo en condiciones muy extremas, como es el caso de que el viento estuviera en calma o soplara con la intensidad de un huracán, fallaba este viejo método de navegación.

Por aquel entonces, la función básica de las naves de guerra era el hacer blanco en el buque enemigo con la cantidad necesaria de proyectiles para destruirlo, procurando que la tripulación del propio gozara de un grado de seguridad razonable. Los buques eran, en esencia, castillos de madera flotantes que mantenían a la gente a cubierto de los proyectiles del enemigo, al mismo tiempo que constituían una plataforma sólida y estable desde la cual poder disparar la artillería. Esta última característica obligaba a hacer el casco suficientemente mangudo y lleno de formas, con el inconveniente de que el buque resultaba muy pesado y de poco andar.

Los cañones de a bordo se designaban por el peso del proyectil que disparaban y los había de distinto calibre. Normalmente, los mayores eran de 32 libras (14,4 kg) y pesaban unas 2,3 toneladas; había también otros de 24, 18 y 12 libras. Como la madera con que estaban hechos los navíos de guerra no podía soportar el peso ni el efecto de los cañones de un calibre superior a 32 libras, el crecimiento de la potencia de fuego se conseguiría aumentando el número de los cañones de 32 libras y de otros calibres menores, procurando distribuirlos por todas las cubiertas existentes, de suerte que los de más peso quedaran siempre abajo.

Para lograr el máximo efecto destructivo mediante el empleo de muchos cañones, era preciso apuntar con todos

ellos al mismo blanco y dispararlos al unísono, lo que constituía la llamada andanada. En la década de 1850, un navío de línea, es decir, el de guerra de mucho porte y susceptible de ocupar un puesto de primera fila en los combates de importancia, llevaba un total de 130 cañones, distribuidos en tres cubiertas o baterías y siendo el peso de los proyectiles disparados en cada andanada del orden de los 825 kg por minuto.

En la primera mitad del siglo XIX, los británicos se sentían muy seguros y satisfechos detrás de sus "murallas de madera". Los enemigos potenciales podían construir buques similares, pero Gran Bretaña estaba por delante tanto en el número como en las características de los mismos, al tiempo que contaba con un núcleo extraordinario de marineros para dotarlos. De hecho, Gran Bretaña dominaba los mares no por poseer una tecnología más avanzada sino por la cantidad de navíos de guerra y la calidad de los hombres que los tripulaban.

Con la balanza del poder naval decididamente a su favor, cualquier innovación que pudiera alterarlo creaba gran preocupación al Almirantazgo Británico. Esto explica que, en todo momento, el Almirantazgo mantuviera una estrecha vigilancia sobre los progresos de los enemigos en potencia y procurara anularlos rápidamente con la respuesta adecuada. De todos modos, era incapaz de poder controlar los progresos de los astilleros dedicados a la construcción de buques mercantes.

La tecnología de la fundición del hierro, así como la relativa a las máquinas de vapor, desarrolladas ambas en Gran Bretaña durante la Revolución Industrial, permitieron mejorar, en gran medida, los sistemas de utilización del vapor introducidos por Robert Fulton y Henry Bell. En 1837, Isambard Kingdom Brunel construyó el *Great Western*, el primer vapor trasatlántico de ruedas digno de confianza, y ocho años después sorprendía al mundo con el *Great Britain*, cuyo casco era de hierro y llevaba como propulsor una hélice.

Para la marina mercante británica, las ventajas de los buques de hierro con hélice eran muy claras: desarrollaban más velocidad, ofrecían mayores garantías de seguridad y duraban más. A mediados del siglo XIX, los buques mercantes de esta clase eran ya muy corrientes. Sin embargo, el Almirantazgo se resistía a seguir ese camino, salvo en la construcción de unas pocas unidades de escaso porte y de carácter experimental.

Sin embargo, Francia, bajo Napoleón III, comenzó a disputar el dominio de los mares a la Marina Real Britá-

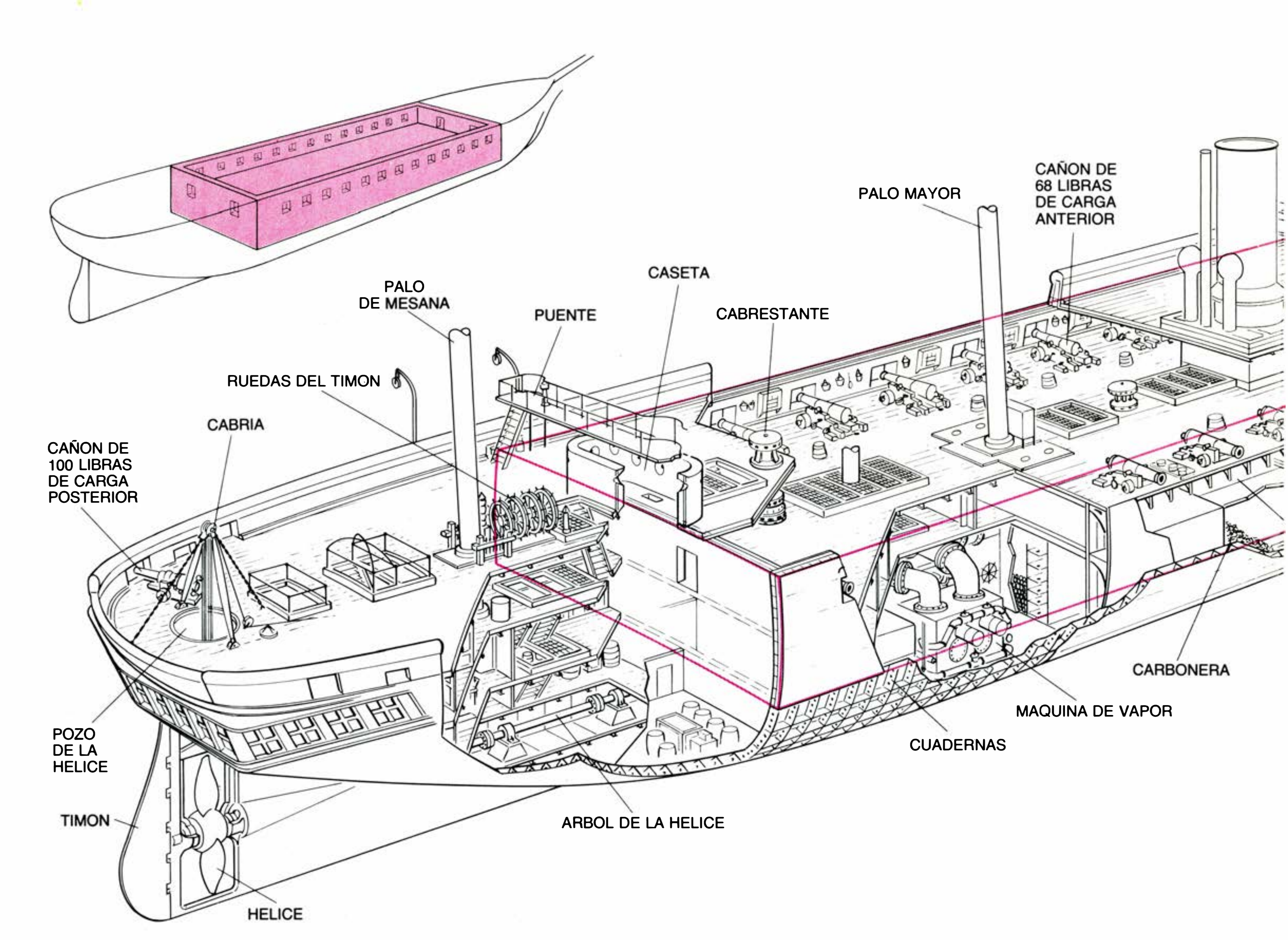


1. UNA VEZ TERMINADA LA RESTAURACION, en junio de 1987, el *Warrior* fue remolcado desde los astilleros de Hartlepool hasta su destino definitivo en Portsmouth (Inglaterra), donde quedó abierto a la visita del público. En la restauración de la nave se invirtieron más de siete años de trabajo, con un coste global superior a los seis millones de libras esterlinas. Esta nave de guerra es la única grande construida en la era victoriana que ha sobrevivido. Su construcción representó el mayor avance tecnológico experimentado a lo largo de la historia naval militar: la sustitución del casco de madera por el acorazado de hierro.

nica, y era más receptiva a la aplicación militar de la nueva tecnología naval. Fruto de ello fue, en 1850, el *Napoleón*, un gran navío de tres puentes, hecho de madera y dotado de máquina de vapor y de hélice. El Almirantazgo Británico, que desde hacía tiempo venía considerando a Francia como su "enemigo natural", se vio obligado a reaccionar. La respuesta fue la instalación del sistema de propulsión a hélice en el *Sans Pareil*. En 1858, ambas naciones contaban con 32 navíos de línea de madera y propulsión mecánica.

La instalación de la máquina de vapor a bordo puso en evidencia las limitaciones propias de la construcción en madera. Los navíos de tres puentes adquirían mucho arrufo por efecto del peso de las calderas y de la máquina de vapor, hasta el extremo de acercarse mucho al límite de rotura. Esto obligaba a disparar la artillería siguiendo la técnica de la andanada progresiva, consistente en abrir fuego con los cañones de proa y luego seguir ordenadamente con los demás, hasta llegar a los de popa. En cierta ocasión, un comandante se olvidó de esta precaución y, al ordenar el disparo de una andanada de tipo tradicional, vio de inmediato las consecuencias: por efecto del esfuerzo a que se vieron sometidos, muchos baos y cuadernas se rompieron o experimentaron daños de consideración, cuya reparación exigió al buque una estancia de seis meses en el dique seco. No obstante, como Gran Bretaña iba todavía en cabeza en cuanto a número de unidades, el Almirantazgo no consideró necesario remediar el problema introduciendo modificaciones en el sistema de construcción.

En Francia, sin embargo, la situación experimentó un gran cambio a raíz del nombramiento del brillante e incansable proyectista naval Stanislas Dupuy de Lôme como director de Material de la Marina. Su primera medida fue paralizar la construcción de navíos de madera. Dupuy de Lôme sabía que, en la guerra de Crimea, las baterías flotantes, protegidas mediante un forro de planchas de hierro, habían resistido perfectamente los impactos de la artillería pesada de la costa. Además, era plenamente consciente de que la calidad del hierro forjado había mejorado muchísimo con respecto al pasado, detalle éste que había pasado inadvertido al Almirantazgo Británico. De ahí que proyectara dotar a la Marina Francesa con una flota entera de naves de hierro, blindadas y de propulsión mecánica. Sin embargo, la economía francesa era,



2. SECCION del *Warrior* que permite apreciar aspectos propios del siglo pasado y detalles que se consideraron, por aquel entonces, revolucionarios. Entre los primeros figuran el mascarón y la bonita galería de popa, destinada al uso de los oficiales. Se había proyectado de forma que pudiera disparar las andanadas tradicionales. Y pese a llevar máquina de vapor, el aparejo (no ilustrado) constituía el sistema de propulsión principal, en tanto que los músculos de los tripulantes se usaban para levar anclas, izar pesos y embarcar provisiones. Entre los detalles calificados de avanzados, podemos citar el que la quilla, cuadernas, baos y forro exterior fueran de hierro forjado y que, por el aspecto exterior, el casco parecía más propio de un rápido *clipper* que de una pesada nave de guerra de primera línea. El *Warrior* disponía también de una sección protegida, y en forma de caja (*de color, en la parte superior izquierda de la ilustra-*

aún, básicamente agrícola y las fundiciones existentes no estaban en condiciones de poder suministrar la cantidad necesaria de hierro para llevar a la práctica su ambicioso proyecto.

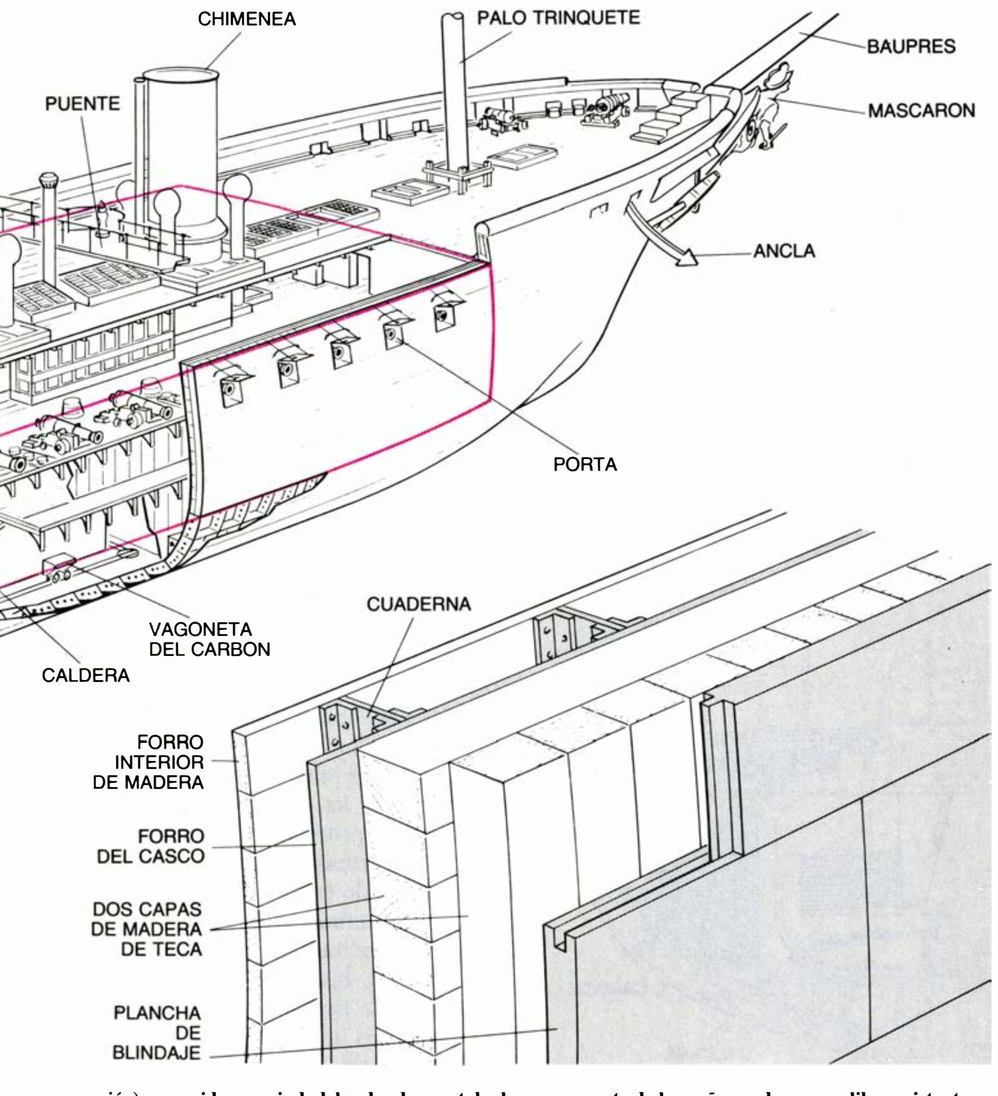
Dupuy de Lôme tuvo que conformarse con una flota de naves de madera, forradas simplemente con planchas de hierro. La primera unidad de este tipo fue la *Gloire*. Se trataba de una fragata blindada, provista de un forro de madera de unos 65 centímetros de grueso, sobre el cual iba otro de planchas de hierro forjado de 12 cm. Se trataba, en realidad, de una nave de vela, pese a llevar también una máquina de vapor, y podía destrozar una flota de unidades de madera, permaneciendo indemne al fuego enemigo.

La construcción de la *Gloire* comenzó en marzo de 1858. Semanas más tarde, llegaban a Gran Bretaña los primeros informes sobre la obra, causando cierto revuelo en el Parlamento. La opinión pública reaccionó también de inmediato, alarmada por la propagación de rumores de una guerra. Ante esa situación, el Inspector del Almirantazgo se vio obligado a hacer, el 28 de junio, la declaración siguiente:

"Gran Bretaña no tiene el menor interés en acometer ningún cambio, ni adoptar un tipo de unidades de construcción nueva y muy cara, salvo verse obligada a ello como consecuencia de la adopción, por parte de alguna potencia extranjera, de unas naves de características tales que exijan el empleo de otras similares para hacerles frente. La ocasión acaba de llegar. Francia ha iniciado la construcción de fragatas de mucho andar y con los costados protegidos mediante planchas de metal muy grueso, lo que convierte en imperativo para nuestro país el hacer lo propio y sin la menor demora."

Todo el mundo creía que la respuesta de Gran Bretaña iba a ser simplemente la construcción de unas fragatas similares, mas el Primer Lord del Mar Sir John Packington se inclinó por un proyecto muy distinto. Con el apoyo del Constructor Jefe, Isaac Watts, y de muchos proyectistas y constructores de buques mercantes, Packington logró convencer tanto al Almirantazgo como al Parlamento británicos de la necesidad de dar un paso sin precedentes: la creación de un buque de guerra de un tipo completamente nuevo, tan avanzado y poderoso que a Francia no le quedara más opción que dejar de competir en el ámbito marítimo.

El objetivo básico del proyecto era muy claro y simple, aunque el llevarlo a la práctica no resultara tan sencillo. Se trataba de hacer un buque nuevo que fuera el mayor, el más rápido, el mejor armado y protegido de cuantos se habían construido hasta entonces. Pese al escepticismo de muchos, el anteproyecto se hizo con suma rapidez, convocándose el concurso al efecto para el día 29 de abril de 1859. Debido a la escasa experiencia de la Marina Real Británica en la construcción de unidades de hierro, se consideró más conveniente recurrir a un astillero especializado en buques mercantes, aunque el Almirantazgo se reservó para sí la parte relativa al armamento. El contrato de construcción fue adjudicado a la empresa Thames Iron Works, de Blackwall, y la puesta de la quilla del buque que sería conocido por *Warrior* tuvo lugar el día 25 de mayo de ese mismo año.



ción), conocida por ciudadela, donde montaba la mayor parte de los cañones de gran calibre existentes a bordo. La ciudadela estaba aislada del resto del buque por medio de mamparos estancos, de tal modo que si la artillería enemiga destrozaba los extremos de proa y de popa del buque, carentes de protección, aquella parte se mantuviera a flote. El detalle de los costados de la ciudadela (*ilustración inferior derecha*) permite apreciar que estaban formados por planchas de hierro forjado de unos 12 cm de espesor, empernadas al forro del casco, hecho de planchas de hierro de 2,5 cm, existiendo entre ambas unos 46 cm de madera de teca.

Pese a la previsión tan acertada de Packington, el *Warrior* conservaba aún, en algunos aspectos, las características propias del siglo precedente. Así ocurría, por ejemplo, con el voluminoso mascarón y la popa de galería intrincadamente decorada. Pero la más destacada de todas era el hecho de estar proyectado como una plataforma estable, desde la cual la artillería, dispuesta en línea a lo largo de los costados, se disparaba siguiendo la típica y antigua tradición de la andanada. Además, aunque el *Warrior* llevaba máquina de vapor y hélice, el sistema de propulsión principal seguía siendo el viento. De ahí que los palos y las velas fueran casi iguales a los de un navío de línea de 80 cañones.

La inclusión de dos sistemas de propulsión requirió la introducción de ca-

racterísticas especiales. Así, por ejemplo, la necesidad de disponer de espacio suficiente para poder dar las velas mayores obligó a hacer las chimeneas abatibles. De modo similar, durante la navegación exclusiva a vela, y con el fin de reducir la resistencia producida por la hélice, se instalaron los medios a propósito para poder desmontarla del eje y estibarla en un entrepuente [*véase la figura 4*]. La maniobra pertinente requería el empleo de un equipo compuesto por más de 600 hombres, frente a los 100 necesarios para levar el ancla, que era la más pesada de la época. La Marina Real Británica estaba tan convencida de que era conveniente para la tripulación hacer unos trabajos tan penosos como los indicados que rechazó la idea de instalar cualquier dispositivo a vapor susceptible de evitarlos.

En muchos aspectos, el *Warrior* estaba muy avanzado con respecto a la época. Tanto la quilla como las cuadernas, baos y el forro exterior eran de hierro forjado. Pero aún había más. Los mamparos que dividían interiormente el casco en varios compartimentos, aumentando al mismo tiempo la resistencia estructural del buque, eran igualmente de hierro y llevaban puertas estancas. Además, sobre la quilla había un segundo plan de planchas de hierro forjado, destinado a evitar las inundaciones susceptibles de producirse en caso de varada. De este modo, el *Warrior* fue también el primer buque de la Marina Real que llevó doble fondo.

Las formas del casco del *Warrior* se obtuvieron de acuerdo con los principios y teorías desarrollados por John Scott Russell; consistían en una serie de relaciones matemáticas entre la eslora, la manga, el calado y la sección transversal. El resultado de todo ello eran unos buques de proa muy llena y popa hidrodinámica. En el caso del *Warrior*, su eslora, medida desde la popa al mascarón, era de 130 metros; su manga, de 18 metros; su calado, de 8 metros, y su desplazamiento, de algo más de 9000 toneladas. El casco sería considerado, hoy en día, como típico de un *clipper*. Con una relación entre eslora y manga, en la flotación, de 6,5, el *Warrior* andaba tanto como aparentaba: navegando a vela, podía superar los trece nudos, en tanto que a vapor pasaba de catorce; con ambos sistemas a la vez, desarrollaba la asombrosa velocidad de diecisiete y medio. Gracias a ello, el *Warrior* estaba en condiciones de superar a cualquier buque de guerra existente.

El *Warrior* llevaba una sección media blindada, conocida por ciudadela, proyectada como parte integrante de la estructura y cuya longitud era ligeramente superior a 70 metros. Dicha ciudadela consistía en una gran caja formada de planchas de hierro forjado, de 12 centímetros de grueso. Estas planchas iban empernadas a un forro de madera de teca de unos 45 centímetros de espesor, situado inmediatamente encima del de planchas de hierro propio del casco, cuyo grosor era de 2,5 centímetros. En estas condiciones, ningún proyectil disparado por un cañón de ordenanza era capaz de atravesar el blindaje. Visto de costado era imposible distinguir la ciudadela de las cabezas del buque sin protección. El buque estaba proyectado de modo que si la artillería enemiga le destrozaba dichos extremos carentes de protección, la ciudadela quedara intacta y a flote.

Los mamparos situados a proa y a popa de la ciudadela constituían otra novedad. Estaban hechos también de planchas de hierro forjado, de unos 10 centímetros de grueso, montadas sobre una superficie de madera de unos 30 centímetros de espesor. Hasta la aparición del *Warrior*, los navíos de guerra no llevaban mamparos transversales. Por este motivo, los marineros encargados del manejo de la artillería quedaban totalmente expuestos a los proyectiles que entraran por la proa o la popa y recorrieran la cubierta en sentido longitudinal.

En la cubierta superior había una pequeña caseta, hecha de madera de teca forrada con planchas de hierro, que hacía las veces de puesto de mando, y en cuyo interior los oficiales quedaban bastante bien protegidos de los proyectiles de las armas portátiles —recuérdese que una de éstas mató a Nelson—. Desde allí, y mirando por los ventanillos que les facilitaban la visión de las cubiertas y de las velas, podían seguir perfectamente las vicisitudes del combate, mientras mantenían la comunicación con el timonel, situado en el entrepuente inferior, a través de la gran escotilla existente a sus pies. Esta caseta significó el primer paso hacia la centralización del mando del buque en

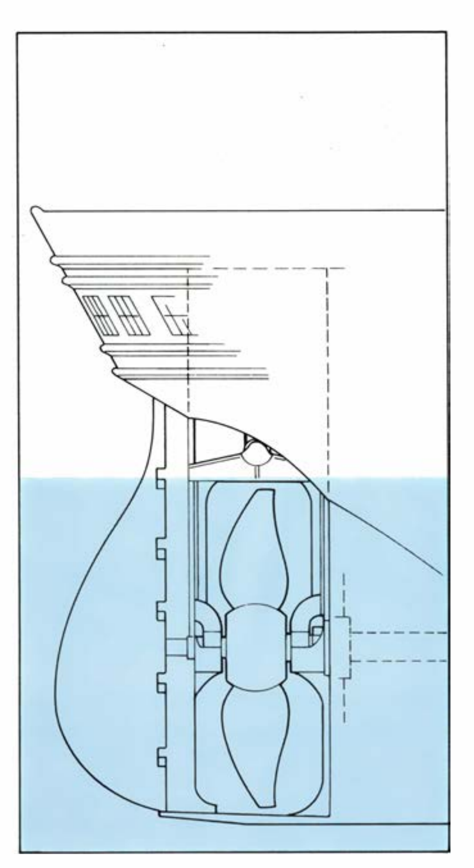
3. LA SECCION MAESTRA permite apreciar la disposición de calderas, carboneras y batería principal de la ciudadela, así como la estructura del doble fondo del mismo. El *Warrior* fue la primera unidad de la Marina Real Británica que contó con esa protección contra las inundaciones en caso de varada.

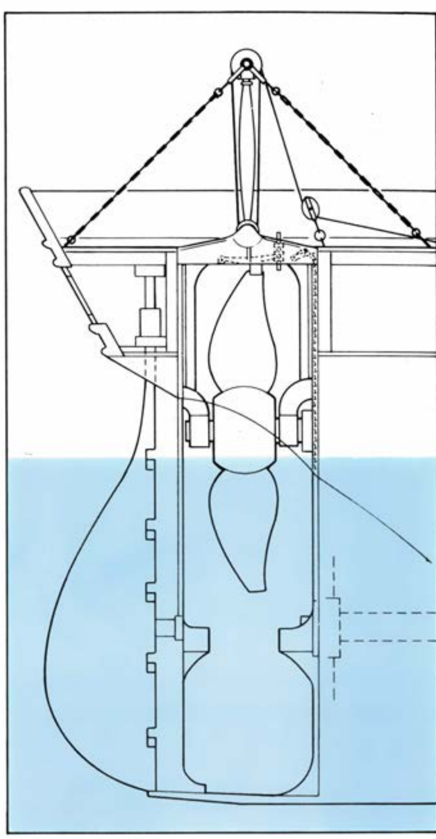
el puente, pese a las objeciones de los oficiales de la Marina Real Británica, quienes, inspirándose quizás en el ejemplo de Nelson, preferían lucir el uniforme por cubierta, en medio del fragor del combate.

En el plan, debajo de la ciudadela blindada, iban las calderas y la máquina de vapor. Esta última había sido construida por la empresa John Penn and Sons, de Greenwich. Era de dos cilindros horizontales, siendo el diámetro de cada uno de 2,8 metros, aproximadamente, y la carrera de 1,2 metros. El pistón, por su parte, hacía el recorrido a una velocidad de unas cinco millas por hora, mientras el eje motor giraba a un máximo de 55 revoluciones por minuto. La máquina tenía una potencia nominal de 1250 caballos, siendo la presión máxima del vapor que la alimentaba de 1,5 kilogramos. Las calderas, en número de 10, consumían carbón y cada una tenía una capacidad de 19 toneladas de agua. Para satisfacer el consumo, el buque llevaba en las carboneras unas 850 toneladas del mejor carbón de Gales. El casco de hierro del *Warrior* soportaba perfectamente todo el peso, tanto de la máquina y de las calderas, como del carbón y del árbol de transmisión.

La alta resistencia del hierro forjado hizo posible obviar también la necesidad de repartir el peso de los cañones, multiplicando su número, haciéndolos de poco calibre y distribuyéndolos por todo el buque. El *Warrior* llevaba menos, pero su calibre era mayor, e iban dispuestos, en gran parte, en una cubierta de la ciudadela. La batería principal estaba formada por 26 cañones de ánima lisa y carga por la boca, que disparaban bolas macizas o granadas de 68 libras de peso (31 kilogramos). Cada cañón, junto con su cureña, pesaba más de cinco toneladas y tenía un alcance teórico de tres millas, aunque el disparo se solía hacer normalmente a media milla de distancia. En el mejor de los casos, los navíos de madera podían llevar un solo cañón de 68 libras y aún entonces debían efectuar el disparo con mucha precaución, puesto que el peso de la pieza, unido al efecto de retroceso, podía ocasionar averías de cierta consideración en la estructura del propio buque. El casco del *Warrior* aguantaba tranquilamente 26 de tales cañones, pudiendo dispararlos incluso al unísono, es decir, en una sola andanada sin el menor riesgo de averías.

El *Warrior* contaba también con los últimos adelantos en materia de artillería: unos cuantos cañones de retrocarga y ánima rayada. El rayado del cañón consiste en una estría en espiral, practicada en la pared interior del mismo, y presenta la ventaja de imprimir a los proyectiles un movimiento de rotación, dándoles una trayectoria más estable. Además, el hecho de cargarlos por la culata evitaba tener que retirarlos de su emplazamiento para poder efectuar esa operación. Sir William Armstrong fue el inventor de este tipo de cañón, que disparaba proyectiles o granadas cónicas de 100 libras (45 kg) o mayores, y tenía un alcance máximo de unas cinco millas. Poco después de la botadura del buque, se montaron a bordo diez de tales cañones. El *Warrior* contaba, además, con otros cuatro de menor calibre, igualmente de retrocarga y ánima rayada, de modo que el porte oficial del buque era de 40 cañones. En él no estaban incluidos un cañón de 6 libras (2,7 kg), otro de 12 (5,4 kg) y dos más de 24 (10,8 kg).



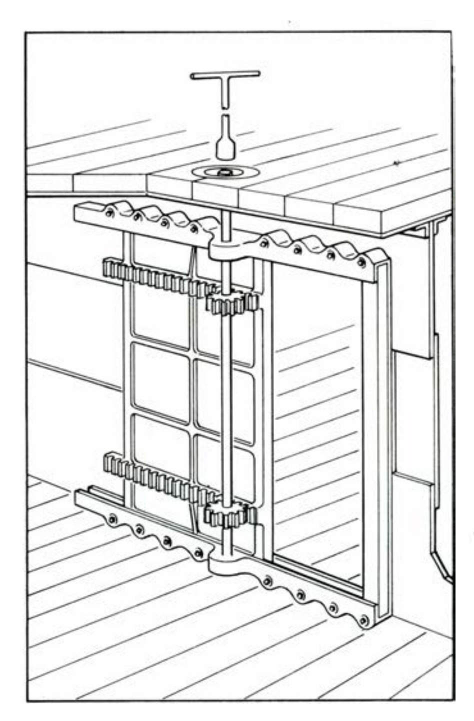


4. DISPOSITIVO PARA DESMONTAR (*a la izquierda*), de su eje de cola, la hélice y alojarla en el interior del *Warrior* (*derecha*); gracias a ello, presenta menos resistencia durante la navegación a vela. Para izarla se precisaban más de 600 hombres, halando de las tiras del aparejo real guarnido a una cabria.

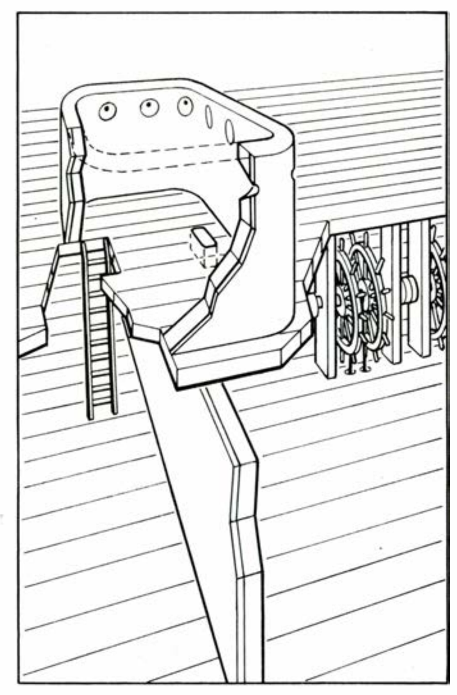
Cualquiera de los cañones grandes del *Warrior* tenía potencia suficiente para destrozar el forro de madera de 60 cm que cubría los costados de los navíos de guerra de la época. De ahí que, a partir de su primera salida a la mar, el día 29 de diciembre de 1860, todos los demás navíos de guerra pasaran a designarse despectivamente como "cáscaras de huevo". Era indudable que el *Warrior* podía enfrentarse a una flota entera de navíos tradicionales, con total impunidad.

El *Warrior*, sin embargo, fue objeto de severas críticas en el propio país. Hubo quienes lo rechazaron, incluso antes de iniciarse la construcción, pues eran incapaces de concebir que una nave de hierro y más de 9000 toneladas de desplazamiento pudiera flotar. Otros, lo criticaban simplemente porque no les gustaba el aspecto, tan distinto del característico de los navíos de costados altos y llenos de color que estaban acostumbrados a ver. El *Warrior*, por el contrario, era de mucha eslora, poca manga e iba pintado monótonamente de negro. A flote, emergía relativamente poco. Por esta razón no tardó en recibir el apodo de *Black Snake* (*Serpiente Negra*).

El armamento desconcertó también. El público mejor informado sabía que el navío de línea clásico de 130 cañones podía disparar, en cada andanada, un conjunto de proyectiles cuyo peso superaba los 725 kg. En el *Warrior*, en cambio, con cañones de mayor calibre,



5. LOS MAMPAROS DE HIERRO del *Warrior* llevaban puertas estancas. No está muy claro si dichas puertas formaban o no parte del proyecto original, pero lo cierto es que se instalaron al principio de la existencia del buque. Dichas puertas se abrían y cerraban por medio de una manivela apropiada, desde la cubierta situada inmediatamente encima.



6. CASETA BLINDADA existente en la cubierta superior del *Warrior*. Protegía a los oficiales de los proyectiles de las armas portátiles, mientras seguían las vicisitudes del combate a través de los ventanillos. A sus pies había una gran escotilla por la que podían dar las órdenes oportunas al timonel, que se encontraba en la cubierta situada inmediatamente debajo.

el peso de cada andanada era sólo de unos 675 kg. Para salir al paso de las dudas, el gobierno británico se vio obligado a precisar que el impacto de un solo proyectil de 68 libras producía los mismos efectos destructivos que cinco de 32 libras; de forma similar, el de 100 libras equivalía a siete de 32 libras. De acuerdo con esto, la andanada del *Warrior* era comparable a una de 1575 kg por minuto disparada por los cañones normales de la época.

El *Warrior* no sólo tenía una potencia de fuego superior a la de dos navíos de línea clásicos, sino también un coste que superaba al de ambos juntos. El navío de tres puentes más grande, hecho de madera, costaba entonces la impresionante cantidad de 176.000 libras esterlinas, en tanto que el del *Warrior* ascendió a 379.154. Tanto en el Parlamento como en la prensa se produjeron enconados debates para dilucidar si tal cantidad de dinero procedente de impuestos se invertía adecuadamente.

Pese a las críticas, cuando el *Warrior* llegó a su base del Canal de la Mancha donde fue destinado, muchos británicos dieron un gran suspiro de alivio, pues, de inmediato, Napoleón III pareció querer desistir de la idea de desafiar el poder naval británico, poniendo más atención a las conquistas en el continente. El *Warrior* lo había conseguido: había disuadido a un enemigo potencial.

Sin embargo, hubo muchos miembros del propio Almirantazgo que se asustaron ante el cambio que se avecinaba, sabiendo que toda la flota de la Marina Real Británica había quedado anticuada. Las demás naciones, al darse cuenta de la situación, iban a construir rápidamente navíos de guerra con casco y coraza de hierro. Y a las que no estuvieran en condiciones de poder hacerlo, les bastaba con adquirirlos en la propia Gran Bretaña, donde los astilleros privados no tenían ningún inconveniente en construirlos para cualquier país, a excepción de Francia, como es lógico. En estas circunstancias, si Gran Bretaña aspiraba a seguir manteniendo el dominio de los mares, no le quedaba otra solución que desguazar toda la flota de madera y sustituirla por otra de hierro.

El *Warrior* se destruyó a sí mismo al lanzar la industria de la construcción naval a una carrera de armamentos. De inmediato, todas las naciones del mundo revisaron los respectivos programas de construcción naval, con el fin de incluir las naves de guerra con casco de hierro, muchas de las cuales aportaron sensibles mejoras con respecto al *Warrior*. La más destacada fue el montaje de cañones de gran calibre que permitieran atravesar la coraza de aquél. Esto obligó a aumentar el grueso de la protección de los navíos de la siguiente generación, aunque tal solución fue en vano. Los de la generación ulterior llevaron cañones de un calibre todavía mayor. No es de extrañar, pues, que la sociedad de la época victoriana, tan pacífica y conservadora, quedara sorprendida ante los avances espectaculares en materia de cañones y de protección, lo que constituía simplemente una manifestación de lo que hoy conocemos por carrera de armamentos.

El *Warrior*, pese a ser el orgullo de Gran Bretaña, desapareció de la vista del público al cabo de muy pocos años. Apenas un lustro después de la entrada en servicio, tras haber sido visitado por la mayoría de cabezas coronadas de Europa, cayó en el olvido. Y en 1871 era ya tan anticuado que se le dio de baja como acorazado de primera clase y pasó a la flota de reserva.

El destino subsiguiente del *Warrior* fue todavía peor. A principios de este siglo se puso a la venta para desguace, pero nadie pujó por él. Como consecuencia de ello, en 1904 pasó a depender de la Vernon Torpedo Training School, de Portsmouth, la cual le cambió el nombre por el de *Vernon III*. En 1924, tras un nuevo fracaso en el intento de venderlo para desguace, se convirtió en el pontón nombrado *Oil Fuel Hulk C77*. Por aquel entonces, tanto los palos como la máquina y la mayor parte de las instalaciones interiores ya se habían desguazado, mientras la cubierta superior quedaba oculta bajo una capa de cemento de 15 cm de espesor.

En 1979, el *Warrior*, cuya existencia conocían sólo unos pocos entusiastas, era el único acorazado británico superviviente de la etapa comprendida entre el navío *Victory*, de Nelson, y el crucero *Belfast*, veterano de la guerra de Corea. Por aquel entonces, el *Warrior* presentaba un aspecto tan desastroso que Su Alteza Real el Príncipe Felipe, duque de Edimburgo, lo puso de manifiesto al Maritime Trust y, en septiembre de ese mismo año, la Marina Real Británica entregaba el *Oil Fuel Hulk C77* a dicha institución. Seguidamente, el casco fue remolcado hasta Hartlepool, en Inglaterra, donde se le sometió a restauración.

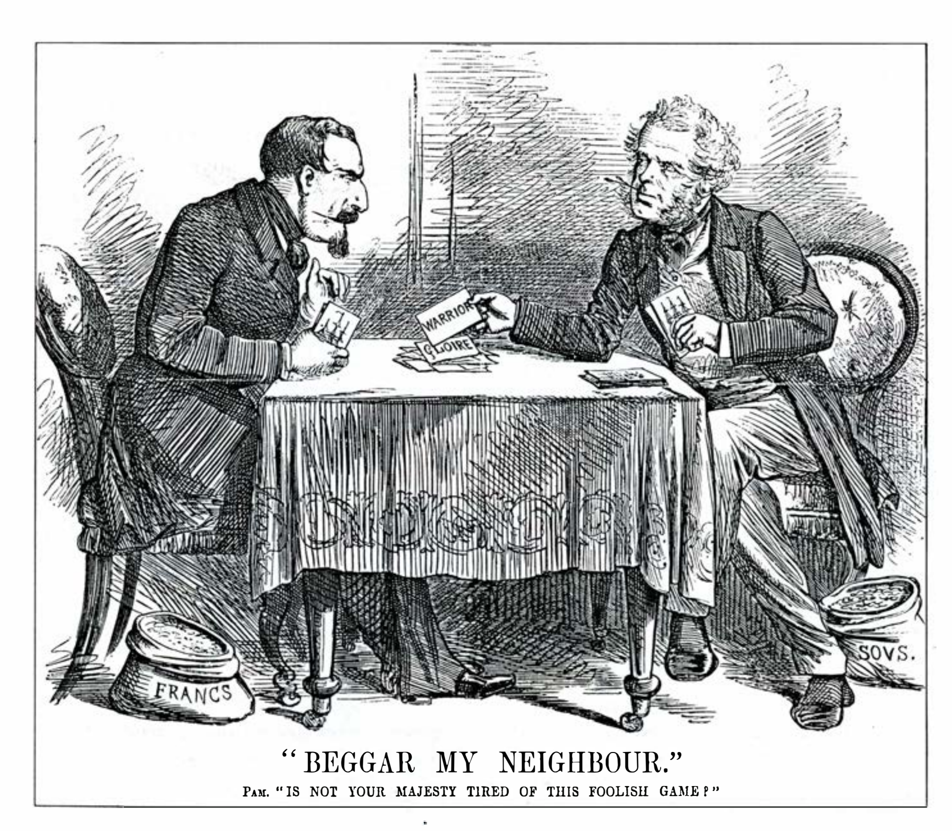
Aunque parezca sorprendente, el casco de hierro forjado mantuvo al buque a flote durante más de un siglo, sin hacer la más mínima gota de agua. Sin embargo, pronto se vio que los trabajos

de restauración iban a ser de una magnitud muy superior a cuantos se habían hecho hasta entonces. Por ese motivo se creó el Fondo para la Restauración del *Warrior*, con la función de recaudar el dinero necesario para la obra, cuya ejecución corrió a cargo de un equipo formado por operarios del astillero de la localidad. En 1984, trabajaban en el proyecto más de 150 personas.

El 12 de junio de 1987, una vez restaurado, el *Warrior* abandonó Hartlepool, hacia su destino final en Portsmouth, donde quedó abierto al público el día 27 de julio. La conservación del casco y del interior, así como la construcción del equipo e instalaciones del siglo XIX, exigieron más de siete años de trabajos, siendo el coste estimado de la obra, en conjunto, de seis millones de libras esterlinas.

Debidamente restaurado y con unos palos y aparejos cuya altura se eleva hasta alcanzar casi 60 metros por encima de la cubierta, el *Warrior* presenta de nuevo un aspecto magnífico. Las cubiertas inferiores están llenas de cañones y de equipo auxiliar. Los bancos y las mesas donde comían los 700 hombres de la dotación están de nuevo en su sitio; sobre ellas aparecen los utensilios de madera utilizados en su día para la pitanza. Los bronces y dorados de los camarotes de los oficiales brillan intensamente al reflejar la luz producida por los candeleros y lámparas de aceite, que son una reproducción de los originales. Los rifles, pistolas, machetes y bayonetas aparecen de nuevo alineados en los armeros. Las ruedas de gobierno actúan otra vez sobre los guardines de cabo que mueven el timón, al igual que lo hacían 127 años atrás. En el cabrestante de la cubierta superior, destinado a levar anclas, caben nuevamente los 100 marineros que exigía la faena. A bordo se han instalado también la máquina y las calderas, que son reproducción de las usadas en su día.

Aunque el *Warrior* revolucionó la construcción naval militar, el hecho de que haya sobrevivido más de cien años ha sido simplemente una cuestión de suerte. Ahora, una vez restaurado y protegido, ha quedado convertido en una muestra de los progresos tecnológicos realizados en Gran Bretaña durante la era victoriana y, al mismo tiempo, sirve de recordatorio de las sorpresas que puede proporcionar la tecnología militar en cualquier época.



7. LA "CARTA *WARRIOR*" fue el triunfo que jugó el Primer Ministro John Palmerston para matar la carta *Gloire* de Napoleón III, según una caricatura publicada en la revista humorística *Punch*, en 1861. La *Gloire* era una fragata de madera y forro de hierro, dotada de propulsión mecánica. Fue la nave de guerra más poderosa hasta la botadura del *Warrior*, que superó a la *Gloire* en velocidad, protección y potencia de fuego. Ante la perspectiva de tener que enfrentarse con unidades como el *Warrior*, Napoleón III decidió no entrar en una carrera naval con Gran Bretaña, dedicando toda su atención al continente europeo.

Fluctuaciones en procesos naturales

En los procesos naturales, físicos, químicos y biológicos, se observa cierto grado de aleatoriedad, de importancia extraordinaria. Estas fluctuaciones no son explicables a partir de teorías deterministas

José María Sancho

Es un hecho bien conocido en el campo de la investigación y en el ámbito industrial que la repetición de un proceso de medida nunca da exactamente el mismo valor. Los valores obtenidos se agrupan en torno a uno central. Tal dispersión de resultados depende de las técnicas empleadas, de los aparatos de medición y de otros factores, la mayoría de las veces desconocidos. Esa aleatoriedad en los valores, conocida también por estocasticidad de las medidas, se va reduciendo con el perfeccionamiento de los aparatos de medición.

En determinados experimentos, sin embargo, nos encontramos con resultados tan dispares unos de otros, tan erráticos, que los investigadores dudarían de la validez del ensayo, inclinándose a pensar que debe haber por medio algún error grave, pues no se cumple una de las características definitorias del trabajo científico: su reproducibilidad en las mismas condiciones. Demos un ejemplo. Sea la reacción química entre los iones clorito y tiosulfato. Para ciertas condiciones iniciales, que siempre se mantienen fijas, la reacción empieza por experimentar un aumento progresivo de su basicidad (*p*H), hasta que llega un momento en que dicha cantidad cae bruscamente. Ese momento puede variar aleatoriamente de 10 minutos a horas. No se trata, empero, de ningún comportamiento anormal, sino que tiene una explicación científica como veremos a lo largo del artículo.

Las fluctuaciones que se observan en los experimentos o mediciones suelen considerarse bajo dos puntos de vista antagónicos: como algo molesto, a evitar en lo posible, y como una muestra directa de la riqueza de la naturaleza. Desde el primer punto de vista, las fluctuaciones constituyen una rémora perniciosa que nos impide apreciar con la nitidez suficiente el "verdadero" valor de la magnitud que estamos observando o midiendo. Y, dado que tales fluctuaciones son, por lo común, pequeñas, suele admitirse que el valor medio de las mediciones constituye una buena determinación del valor "verdadero" de la magnitud que es objeto de estudio.

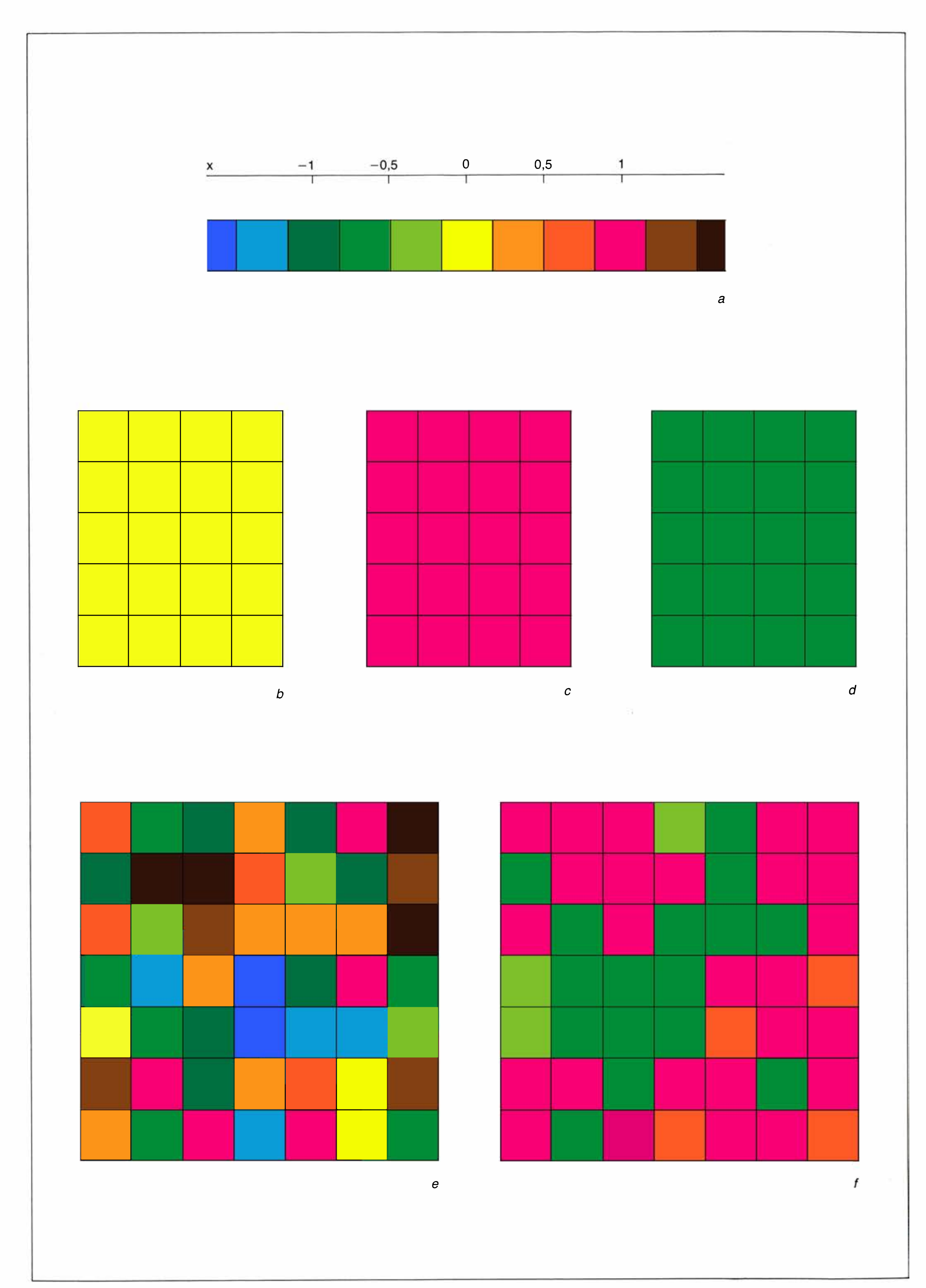
Así consideradas, las fluctuaciones vendrían a ser el precio de incertidumbre que se ha de pagar en todo trabajo experimental ante la multitud de deficiencias que presentan los aparatos de medición y las inevitables impurezas del sistema observado. Coherentes con ese razonamiento, se piensa que los avances técnicos en el campo de la medición se encargarán de ir reduciendo progresivamente la importancia de esas fluctuaciones y que, una vez acotada la magnitud relativa de dicha aleatoriedad, deben dejar de preocuparnos, pues no aportan nada nuevo a nuestro proceso de medición u observación. Esta visión de las fluctuaciones podríamos denominarla determinista, por cuanto se apoya en el siguiente supuesto: las leyes que gobiernan nuestros sistemas son deterministas en el sentido de que predicen consiguientemente valores bien definidos, correctamente identificados en el experimento aunque se tenga que tomar el valor medio de muchas observaciones repetidas.

En el segundo punto de vista, no tan extendido entre la comunidad científica, se concede a las fluctuaciones (o en una forma más general a la aleatoriedad de los resultados) un papel incluso más importante que el otorgado a las leyes deterministas. Y de acuerdo con esa óptica, se explica la diversidad del mundo biológico o químico en función de azares que crearon una configuración o estructura más abundante que otra, siendo ambas, en principio, igualmente probables.

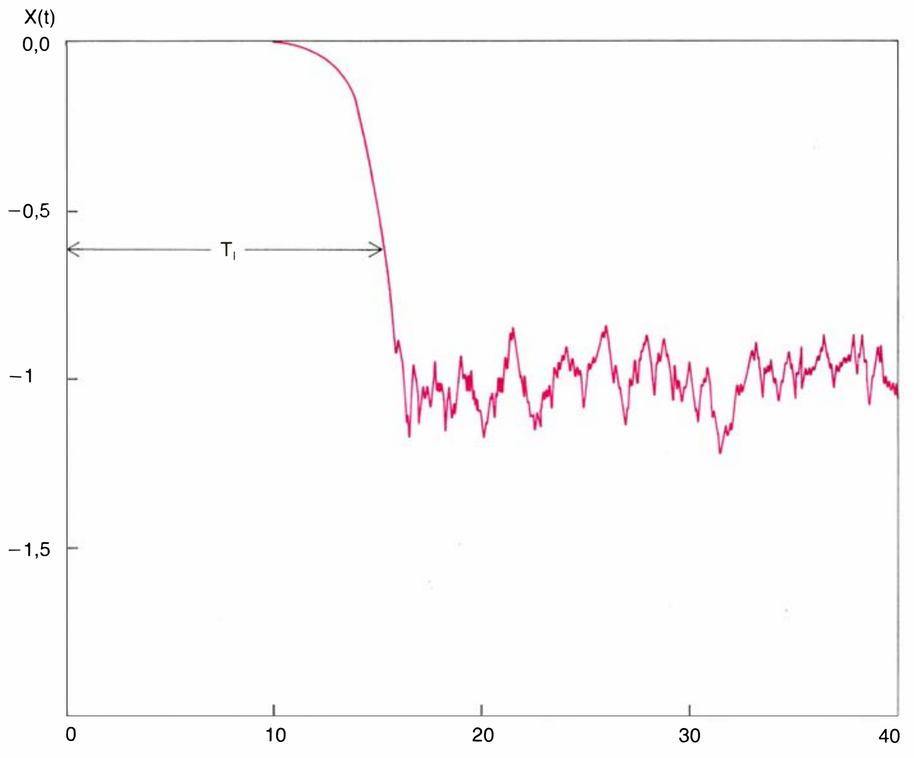
En este artículo se sostiene un punto de vista intermedio, expuesto aquí a través de ejemplos muy simples sobre la interconexión entre las fluctuaciones y las leyes deterministas. A partir de ellos podremos sacar algunas conclusiones generales que serán útiles para entender, en una suerte de viaje de vuelta, esos mismos ejemplos y otras observaciones parecidas. En particular, veremos cómo la presencia de fluctuaciones es necesaria para explicar cierto tipo de procesos de interés que no ocurrirían sin ellas y comprobar así que su efecto es más importante que el mero alterar un tanto los "verdaderos" resultados de una medición.

De entre las múltiples maneras con que puede abordarse un experimento,

1. EFECTOS DE LAS FLUCTUACIONES, puestos de manifiesto a través de un mosaico de colores. A cada cuadrito de la figura se le asigna un color que depende del resultado de la ecuación dinámica $\dot{x} = x - x^3 + (D^{1/2}\mu(t))$. D es un parámetro que representa la intensidad de las fluctuaciones y $\mu(t)$ es la fluctuación aleatoria. En *a* se da la tabla de conversión de valores de x en colores. Los sectores *b*, *c* y *d* ilustran los estados estacionarios que predice este modelo cuando no hay fluctuaciones: $D = 0$; *e* muestra el efecto de las fluctuaciones para un valor de $D = 0,5$. Los colores aparecen muy mezclados. El sector *d* manifiesta el drástico efecto producido por fluctuaciones muy pequeñas: $D = 0,01$; sólo se dan practicamente dos colores. Conviene señalar, sin embargo, que los mosaicos *d* y *e* se han obtenido para cierto tiempo fijo, $t = 4$. Si siguiéramos la evolución detenidamente, observaríamos cómo los colores se van intercambiando unos con otros, aunque conservando aproximadamente las mismas proporciones entre ellos. Las diferencias que se observan entre los mosaicos superiores (deterministas) y los inferiores (con fluctuaciones) son notables y ponen de manifiesto el gran efecto que pueda tener la presencia de las fluctuaciones, aunque éstas sean muy pequeñas.

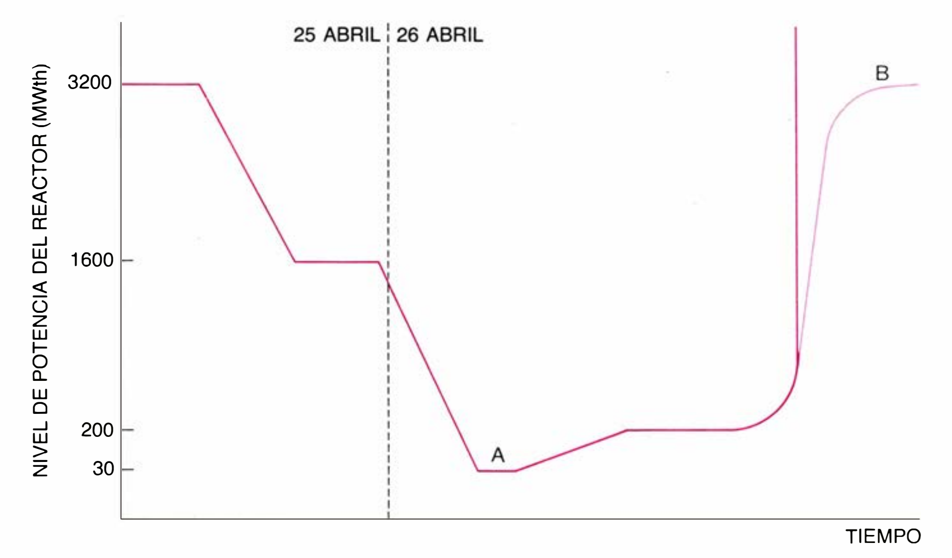

x
−1
−0,5
0
0,5
1
a
b
c
d
e
f

caracteriza al proceso y nos aporta información sobre la estabilidad de los sistemas y la dinámica de los cambios entre distintos estados posibles.



2. TRAYECTORIA SEGUIDA POR UN SISTEMA que abandona un estado inestable. Se observa claramente cómo, transcurrido cierto tiempo, T_I, el sistema decae hacia un estado distinto del inicial, que era inestable. La trayectoria corresponde a la simulación de un láser en presencia de fluctuaciones internas cuánticas y fluctuaciones externas introducidas a través del bombeo óptico. Las primeras son responsables de la relajación inicial y, las segundas, de las fluctuaciones que se observan una vez ha decaído el sistema.

comenzaremos por considerar un proceso dinámico. Imaginemos que el sistema, puesto en un estado inicial, evoluciona hacia un estado estacionario final compatible con los parámetros de control. (Por parámetros de control se entiende las variables que influyen en el resultado de un experimento.) Para descubrir el papel desempeñado por las fluctuaciones en este tipo de procesos, atenderemos al tiempo característico durante el cual ocurre la transición de un estado al otro. El tiempo en cuestión es una magnitud relevante, pues



3. DIAGRAMA DE LA POTENCIA CALORIFICA producida por el reactor nuclear de Chernobyl durante el período de tiempo en que tuvieron lugar los hechos. Los técnicos de la central nuclear situaron inicialmente el reactor en un estado estacionario de potencia mínima (A). Manipulaciones posteriores de los elementos de control del reactor convirtieron dicho estado en inestable, siendo el estado estable otro de potencia muy superior (B). En esta segunda situación el reactor era inestable y se desencadenó el proceso dinámico de evolución hacia el estado estacionario estable correcto. Las estructuras del reactor no pudieron soportar el aumento súbito del calor producido, fallaron y el reactor terminó por estallar. La línea rosa señala el recorrido ideal que habría evitado la catástrofe, por más que en sistema tan complejo como éste resultaría difícil de conseguir. (Interpretación del autor de la figura aparecida en *Physics Today* de diciembre de 1986.)

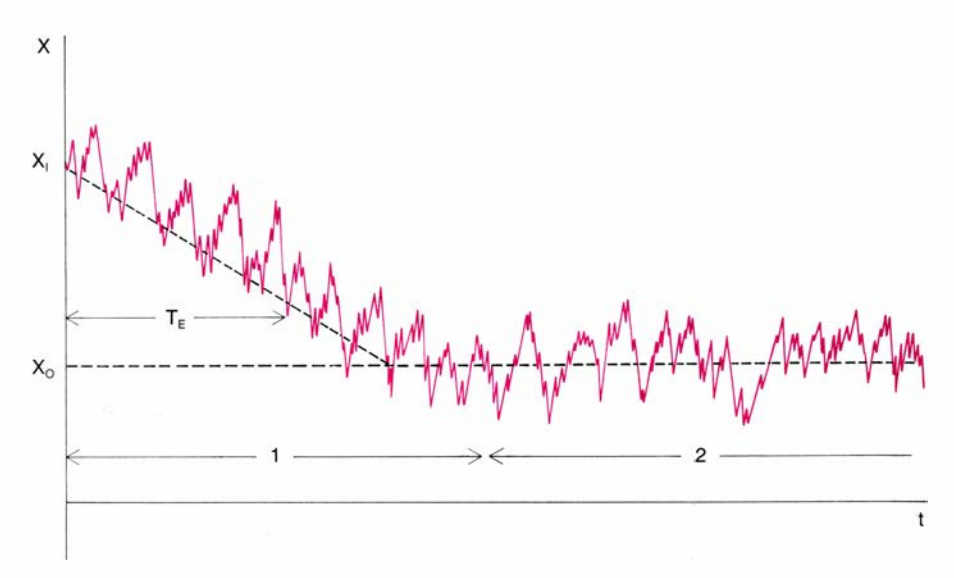
Empecemos por un proceso de relajación de un estado inestable. (El accidente de Chernobyl sería un caso extremo, de dramáticas consecuencias.) Las propiedades de dicho estado se aprecian mejor a través de un modelo sencillo. Situemos una bolita en la cima de una esfera, o de un potencial en forma de parábola. Las leyes deterministas de la mecánica aseguran que la bola permanecerá siempre en dicho lugar, pero la experiencia común nos enseña que caerá por alguno de los lados (la elección del camino es un elemento de aleatoriedad con importantes consecuencias en sistemas mucho más complejos); la causa de su caída no será otra que la presencia de pequeñas fluctuaciones, no importa cuán pequeñas sean [*véanse la figura 2 y el cuadro A*]. De todos modos, el proceso de caída no es instantáneo, aunque sí rápido (explosivo en muchos casos) con un tiempo característico que depende de la intensidad de las fluctuaciones: a menor intensidad de las fluctuaciones, mayor tiempo de evolución. Importa que el potencial tenga forma de parábola invertida en la cima, pues en caso contrario variaría la clasificación del proceso, según veremos más adelante. (El accidente de Chernobyl se debió a una manipulación errónea de los elementos de control del reactor, que situó a éste en un estado inestable de baja potencia. La presencia inevitable de fluctuaciones de neutrones hizo evolucionar el reactor hacia un estado estacionario de alta potencia que correspondía a los nuevos parámetros de control. Por tratarse de un proceso muy rápido, no pudo eliminarse la energía calorífica, lo que desencadenó la explosión con las consecuencias ya conocidas.)

Como segundo ejemplo consideraremos la relajación de un estado marginal inestable. Puede éste definirse como el punto de inflexión plano de un potencial. Para mejor comprensión de este estado seguimos con los modelos sencillos y colocaremos ahora la bolita en un falso llano de la ladera de una montaña [*véase el cuadro A*]. Igual que antes, la bola permanecerá en dicho punto para siempre, tal y como establecen las leyes deterministas de la mecánica. También aquí las experiencia ordinaria nos dice que ello no será así indefinidamente y que la bola acabará rodando valle abajo. La causa, de nuevo, reside en la presencia de fluctuacio-

nes, que al mover un poco la bola provocan que ésta se precipite por la ladera. El proceso será más lento que en el caso anterior ya que el suelo donde se situó la bola es más "plano". El tiempo característico será, en consecuencia, más largo y seguirá otra ley que depende de la intensidad de las fluctuaciones [*cuadro A*]. Si bien, el comportamiento cualitativo será igual en ambos casos.

En un tercer ejemplo consideraremos la relajación de un estado estable, que se caracteriza por ser un mínimo absoluto del potencial. Hay aquí dos situaciones que merecen atención: si colocamos la bola sobre la ladera de la pendiente, caerá hacia el fondo en virtud de las fuerzas deterministas sin necesidad de que intervengan las fluctuaciones; si dejamos la bola en el fondo de un pozo parabólico, sabemos que la bola no se moverá del lugar pero las fluctuaciones harán que oscile alrededor del punto de equilibrio [*véase la figura 4*]. El tiempo característico de ambos procesos será el correspondiente a la evolución determinista y las fluctuaciones carecerán de importancia [*véase el cuadro A*]. Se trata de la situación habitual en las mediciones usuales que corresponden a estados estables bien definidos y donde las fluctuaciones desempeñan un papel secundario. Los defensores del primer punto de vista arriba mencionado se apoyan, sobre todo, en este tipo de procesos.

Abordaremos, como último ejemplo, el proceso de relajación de un estado metaestable o biestable, llamado así porque no constituye ningún estado único, sino que hay otro semejante al mismo. Siguiendo con las definiciones mecánicas, el potencial presenta ahora dos mínimos relativos, o pozos [*véase cuadro A*]. El experimento consiste en alojar la canica en cualquiera de ellos. De acuerdo con las leyes deterministas, la bola permanecerá allí por siempre; pero, ¿qué pasará si la bola se ve sometida a fluctuaciones no acotadas? Fácilmente podemos intuirlo. Si alguna fluctuación de esas alcanza magnitud suficiente, podrá empujar la bola y enviarla hacia el otro pozo, donde permanecerá hasta que se repita el proceso de vuelta, y así sucesivamente. La situación viene representada en la figura 3, que corresponde a un proceso real. La observación, que no puede explicarse mediante leyes deterministas, se justifica por la intervención de las fluctuaciones, aunque esta vez se exige que exista la probabilidad de una fluctuación suficientemente grande.

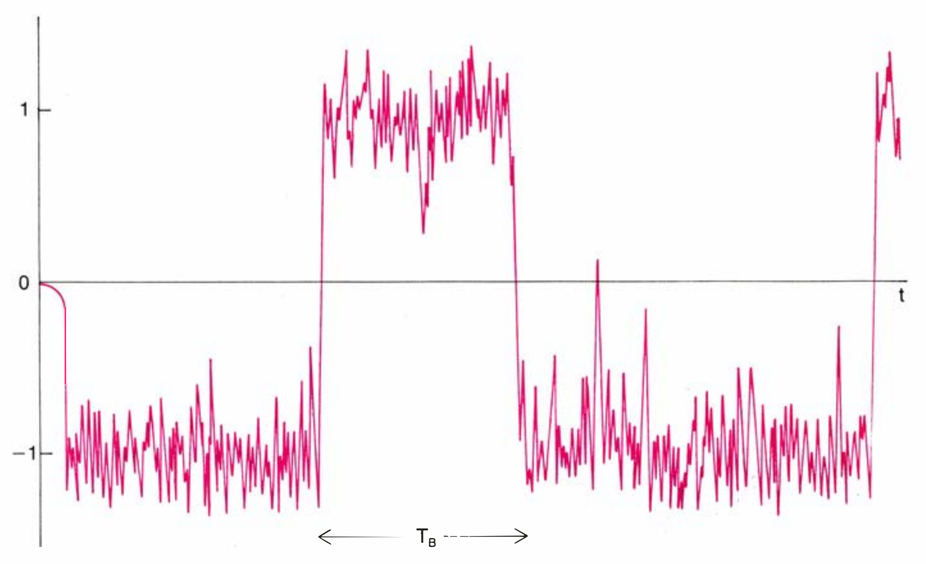


4. TRAYECTORIA DE LA REJACION DE UN ESTADO ESTABLE. En la parte 1 se aprecia el proceso típico de relajación y en la parte *2* se observan las fluctuaciones en el estado estacionario. En ambas partes las fluctuaciones no se alejan mucho de la evolución determinista (*línea discontinua*), que es la característica fundamental del estado estable. La trayectoria corresponde a un láser y se ha simulado en un ordenador.

Sabemos, en efecto, que el tiempo característico que tarda en atravesar la barrera es el tiempo que permanece la bola en un pozo. Se trata del tiempo que, en química, se denomina tiempo de Arrhenius, en honor del químico sueco S. A. Arrhenius. Si partimos de la hipótesis de que los pozos representan estructuras macroscópicas bien definidas, entonces, para pasar de una a otra −de un pozo a otro−, tendremos que aumentar las fluctuaciones, lo que se consigue muchas veces elevando la temperatura. El comportamiento del tiempo característico de este proceso es cualitativamente el mismo que en los casos anteriores, pero ahora su magnitud es mucho mayor, lo que explica, por ejemplo, la estabilidad de una determinada molécula a temperatura ambiente.

Aunque hemos escogido estos ejemplos sencillos, las ideas subyacentes pueden generalizarse a otras situaciones. Pensemos así en el tiempo de aparición de una nueva fase después de un calentamiento o congelación súbita, el tiempo característico de una reacción química (la combustión, por ejemplo), el tiempo medio de la estabilidad de una molécula o macromolécula, etcétera. Los ejemplos expuestos anteriormente son de una sola variable, pero en los procesos reales se dan muchas variables, lo que origina más posibilidades: estructuras ordenadas, periódicas, etcétera.

Ante los ejemplos indicados, convie-



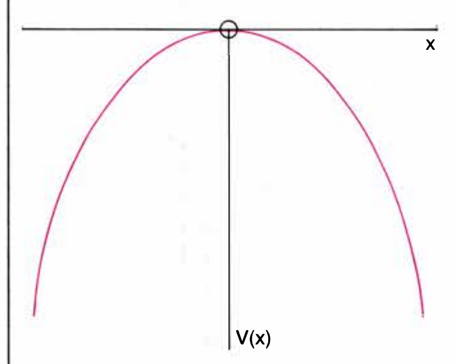
5. TRAYECTORIA DE LA BIESTABILIDAD. Corresponde a un sistema que tiene dos estados igualmente probables. Con la expresión T_B se simboliza el tiempo característico de permanencia en uno de los dos estados. Obsérvese que el tiempo de relajación inicial T_I es mucho menor que T_B. La trayectoria corresponde a un modelo matemático simulado mediante los circuitos de las figuras que aparecen en las páginas siguientes.

CUADRO A

Tiempos característicos

Importa conocer qué forma adquiere el tiempo característico en función de la intensidad de las fluctuaciones, D. Ese tiempo característico especifica bastante bien la dinámica de un proceso de relajación en función de la magnitud de las fluctuaciones. Hasta tal punto eso es cierto que, si desconocemos la teoría a aplicar a un determinado sistema pero disponemos por vía experimental de datos sobre sus tiempos característicos, podemos asegurar con buena aproximación cuáles son los tipos de procesos que se están desarrollando en el sistema. Lo que resultará de obvio provecho para la construcción posterior de una teoría adecuada del sistema.

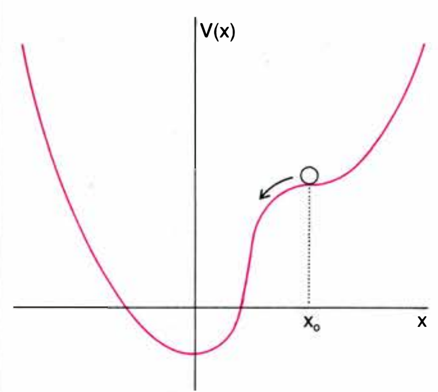
Empecemos con la *relajación de un estado inestable*. El proceso se ilustra mediante la siguiente gráfica, en la que se aprecia el potencial en forma parabólica ($V(x) = x^2 + ...$) y la bola se sitúa en la parte superior. El tiempo característico de la caída de dicha bola viene dado por la ley



$$Ti \simeq Ln(1/D) + ...$$

que nos indica que el proceso es muy rápido y que D ha de ser muy pequeña si queremos apreciarlo.

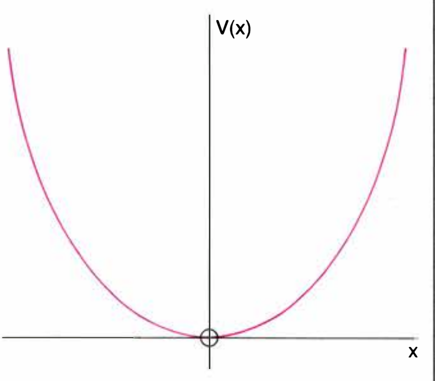
Relajación de un estado marginal. En la figura se observa que la bola se encuentra en un falso llano de la ladera del potencial (estado marginal). En ese punto, el potencial tiene una expresión matemática en forma de polinomio de grado superior a dos ($V(x) \simeq (x\text{-}x_o)^n + ...$; siendo $n > 2$); el tiempo característico de la caída de la bola viene dado por la ley



$$T \simeq D^{\frac{2-n}{n}} + ...; \text{ para } n > 2$$

Así, pues, el tiempo característico aumenta cuando disminuye D, si bien lo hace de una manera más pronunciada que en el caso anterior de relajación de un estado inestable.

Relajación de un estado estable. Corresponde este estado al mínimo absoluto de un potencial, tal y como se aprecia en esta figura.

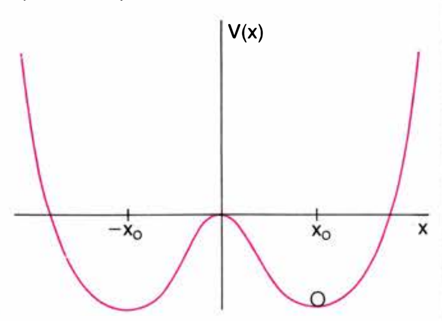


La bola situada en ese punto oscilará alrededor del mismo. El tiempo característico que corresponde a este movimiento viene dado por la siguiente ley:

$$T_E \simeq | V''(x^o) |^{-1} + ...$$

Así, pues, T_E no depende de las fluctuaciones si éstas son muy pequeñas. Lo que equivale a decir que el tiempo característico es el mismo que en ausencia de fluctuaciones. Su papel aquí es casi despreciable.

Relajación de un estado metaestable (*biestable*). De acuerdo con la figura inferior se aprecian aquí los dos mínimos relativos del potencial que corresponden a cada estado metaestable. La bola podrá pasar de un pozo al otro si existen fluctuaciones. El tiempo característico de permanencia de la bola en un pozo sigue la siguiente ley:



$$T_B \simeq \exp (\delta V / D) + ...$$

donde δV depende de la barrera que la bola ha de superar hasta llegar al otro pozo. De lo que se infiere que, para una D muy pequeña, este tiempo puede ser enorme.

Los casos expuestos en este cuadro se obtienen a partir de un potencial del tipo

$$V(x) = - ax^2 + bx^4 + \beta x$$

y la dinámica viene dada por una ecuación diferencial estocástica (la de Langevin)

$$\dot{x} = -V(x)' + \mu(t)$$

donde $\mu(t)$ es un proceso aleatorio o ruido escogido que introduce de ese modo las fluctuaciones en el sistema.

---

ne dejar claro que la existencia de tales fluctuaciones es una característica intrínseca de todos los sistemas reales. Son, pues, inevitables en todos los sistemas naturales. La intensidad de estas fluctuaciones, que llamaremos internas, se mide mediante un parámetro que denominaremos D. Hay varias clases de fluctuaciones internas, todas ellas presentes en los fenómenos naturales si bien con diferente incidencia de acuerdo con la situación concreta del sistema. Así, en los fenómenos térmicos y químicos, la intensidad de las fluctuaciones será proporcional a la temperatura absoluta; en los fenómenos atómicos o nucleares, a la constante universal de Planck, y en los sistemas químicos finitos al inverso del volumen del sistema o del número de moléculas que intervienen en la reacción. En cada situación habrá que analizar cuál de ellas será la dominante.

Hemos comprobado, pues, la necesidad de incluir fluctuaciones de origen interno para describir fenómenos como la relajación de estados inestables o transiciones espontáneas entre estados estables. Exceptuando esos fenómenos, las fluctuaciones internas pueden despreciarse, sin mayores inconvenientes, en la mayoría de los sistemas muy grandes y siempre que estemos lejos de una transición de fase. Existe, sin embargo, otro tipo de fluctuaciones, que llamaremos externas, debidas a la estocasticidad del medio que rodea al sistema o a los parámetros de control del mismo.

La principal distinción entre estas fluctuaciones externas y las primeras estriba en que son controlables y, por ello, no pueden despreciarse tan fácilmente. Se trata de fluctuaciones que inducen cambios sustanciales con respecto a las fluctuaciones internas: pueden dar origen, por ejemplo, a nuevos estados macroscópicos estables o a que se desplacen los puntos de inestabilidad que delimitan las distintas fases. Ocurre, además, que esas fluctuaciones pueden producirse y controlarse en el laboratorio, lo que permite un estudio más preciso de su influencia en el comportamiento del sistema. Para ilustrar su importancia, escogeremos sistemas simples, homogéneos y en los que se puedan despreciar las fluctuaciones internas. Como variables concretas se pueden tomar la densidad de moléculas de cierta especie, la intensidad de la luz transmitida a través de un medio, etcétera.

¿Qué procedimiento emplear para introducir esas fluctuaciones? La dificultad estribará ahora en cómo repre-

sentar las fluctuaciones del medio que rodea al sistema o las correspondientes a los parámetros de control, ya que no es presumible que éstos puedan mantenerse a un valor constante. Hay que buscar, pues, una descripción fenomenológica que tenga en cuenta estas fluctuaciones externas, totalmente independientes del sistema.

El primer paso a dar en esa descripción consiste en partir de una ecuación del movimiento determinista para la variable que represente nuestro sistema. Las ecuaciones de ese tenor son, la mayoría de las veces, muy similares a las que aparecen en cinética química y dependen de parámetros externos, tales como potenciales eléctricos, concentraciones de los reactantes, catalizadores, etcétera. Las fluctuaciones externas se introducen a través de estos parámetros, suponiendo que, en vez de tomar un valor constante bien determinado, fluctúan en torno a cierto valor medio. La ecuación del movimiento de partida se convierte ahora en una ecuación diferencial estocástica, cuyas características matemáticas pueden tener distintos grados de complejidad que no es necesario explicitar aquí. (En el cuadro *B* se indican algunas de las posibles elecciones para estas fluctuaciones.) La incidencia de tales fluctuaciones en el comportamiento del sistema puede ser muy complicada muchas veces, lo que obligará a introducir drásticas simplificaciones si se quiere obtener algún resultado operativo. A modo de ejemplos que nos aclaren lo expuesto, fijémonos en dos situaciones que hemos tomado de campos dispares.

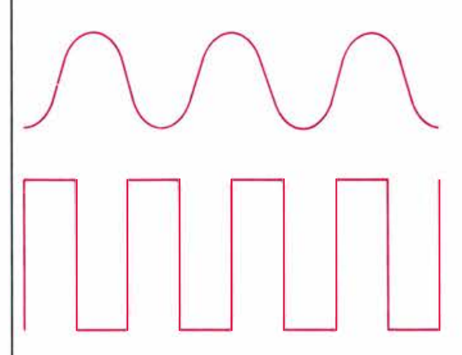
Veamos qué ocurre en las reacciones químicas sometidas a la influencia de la radiación luminosa. Pertenecen a este grupo la fotosíntesis o el equilibrio oxígeno-ozono de las capas altas de la atmósfera. En ambos casos, el sistema se halla sujeto a distintos tipos de fluctuaciones de la luz incidente. Sería, pues, de desear conocer el efecto de dichas fluctuaciones sobre el sistema; ahora bien, ello no es fácil en esos casos por no poder controlarse las fluctuaciones. Por fortuna para nosotros existen reacciones fotoquímicas que se estudian cómodamente en el laboratorio; en ellas, la intensidad de la luz incidente constituye un parámetro externo que se manipula fácilmente y permite estudiar el efecto que las fluctuaciones de intensidad provocan en el sistema. Surge entonces una dificultad teórica: no se conocen todos los pasos de las reacciones químicas involucradas, pero en cambio el experimento sí que se puede llevar a cabo. Consideremos, por ejemplo, la

CUADRO B

Diferentes tipos de fluctuaciones

Indicaremos aquí los principales tipos de fluctuaciones o ruidos. Los dividiremos en dos grupos: fluctuaciones periódicas deterministas y fluctuaciones estocásticas o ruidos. El primer grupo servirá únicamente para resaltar mejor las características del segundo.

Fluctuaciones periódicas deterministas. Se trata de oscilaciones de periodo fijo que puede adoptar varias formas. Aquí escogeremos dos sencillas. La primera es la función sinusoidal, que tiene una frecuencia fija y es una onda perfecta, tal como se observa en el esquema superior la figura inferior:



El segundo caso es una función periódica cuadrada que puede asociarse a una superposición de muchas ondas sinusoidales de distinta frecuencia. Los sistemas sometidos a este tipo de fluctuaciones no necesitan ninguna descripción probabilística. Su utilidad reside en estudiar fenómenos de resonancia, armónicos, etcétera.

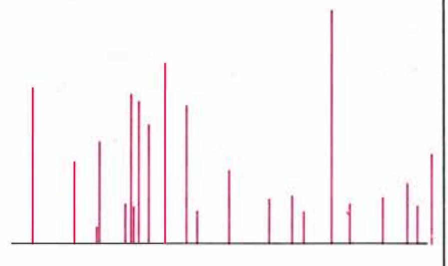
Fluctuaciones estocásticas (ruidos). Dentro de este grupo vamos a considerar aquellos ruidos que aparecen con mayor frecuencia en la literatura científica.

a) Ruido blanco gaussiano. Presenta un aspecto granuloso, como pone de manifiesto la figura inferior. Los valores que toma siguen

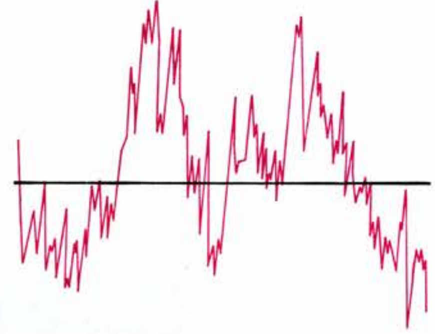


una ley de distribución normal. Este proceso, el más utilizado por su sencillez matemática, sólo necesita un parámetro para su descripción: la intesidad *D*. Se recurre a él cuando no se conoce bien el ruido a que realmente está sometido el sistema, así como para representar las fluctuaciones de origen interno (verbigracia, en el movimiento browniano). Se simula fácilmente en el laboratorio (hay generadores de ruido en el comercio) y mediante el ordenador.

b) Ruido blanco de Poisson. Consta de una sucesión de pulsos a intervalos aleatorios. La intensidad de los mismos puede ser aleatoria o fija. La figura ilustra un caso de intensidad aleatoria. Dicho ruido tiene interés en circuitos eléctricos y en reacciones nucleares. Fácil de simular por ordenador.

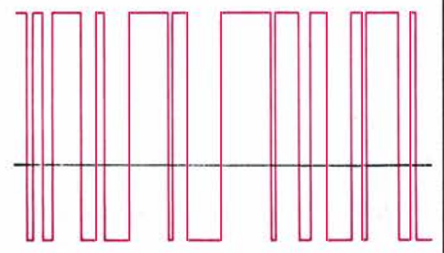


c) Ruido de color gaussiano. Muy semejante al ruido blanco gaussiano, pero posee un parámetro más, τ, que es el tiempo de correlación. Para τ igual a cero, los picos de la figura siguiente se aproximan más unos a

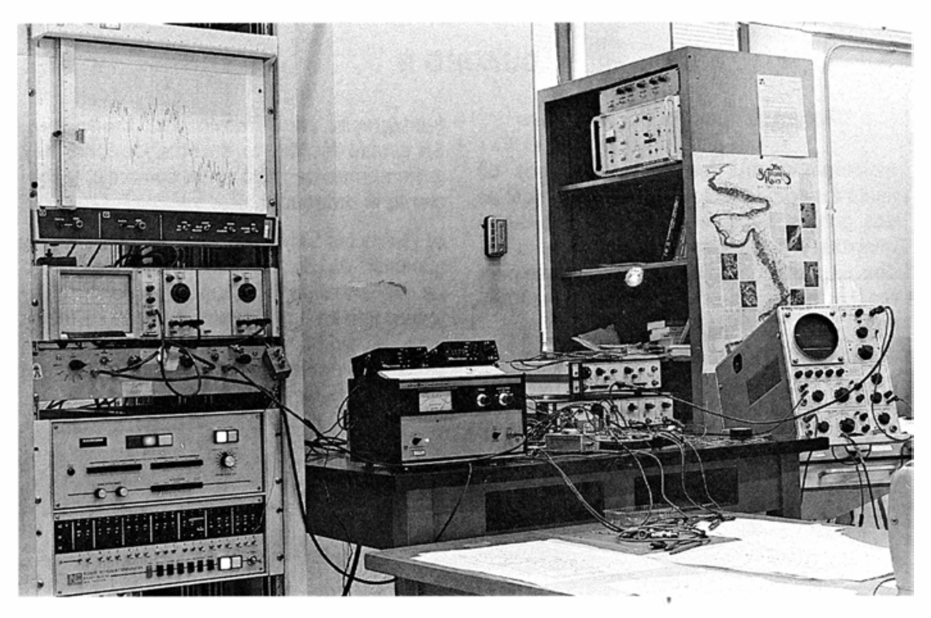


otros, y como límite tenemos la gráfica del ruido blanco gaussiano. Se trata de una fluctuación muy cercana a los ruidos reales, por cuya razón se recurre a ella para representarlos. La descripción matemática de los procesos influidos por este ruido es muy compleja. Se simula también fácilmente en el laboratorio y en el ordenador. La velocidad de una partícula browniana libre sigue este tipo de proceso.

d) Ruido dicotómico. Tiene el aspecto que dibuja la figura. Se llama también señal tele-

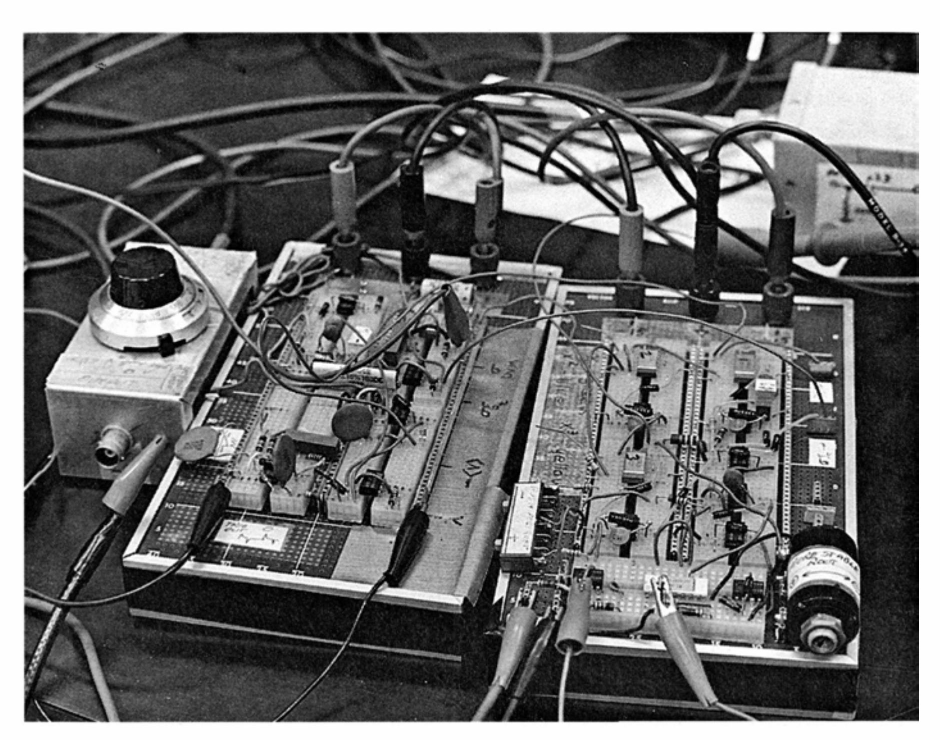


gráfica aleatoria y se caracteriza por poseer dos valores posibles y una determinada probabilidad de permanecer cierto tiempo en cada valor. Fácil de simular por ordenador y en el laboratorio.



6. EQUIPO NECESARIO PARA LA SIMULACION ANALOGICA, con los elementos para procesar las señales y crear la representación gráfica (*izquierda*). En el centro aparecen el generador del ruido y los circuitos. (Fotografía cedida por Frank Moss, de la Universidad norteamericana de San Luis, Missouri.)

reacción de Briggs-Raucher (BR), que es una reacción química oscilante y cuyas características se especifican a continuación; ella nos va a permitir observar el efecto producido en el sistema por las fluctuaciones de la intensidad de la luz incidente. La reaccion BR incorpora los siguientes reactantes: iodato potásico, peróxido de hidrógeno, ácido perclórico, sulfato de manganeso (II) y ácido malónico. Los reactantes se introducen, a través de un flujo constante, en un reactor, donde se mezclan rápidamente mediante un agitador. Y con ese mismo ritmo se va extrayendo materia, por lo cual el volumen permanece constante. (La temperatura se ha mantenido constante también.) Importa en el ensayo conocer la densidad óptica de la mezcla para una determinada longitud de onda; y sabemos de la extremada sensibilidad de dicha mezcla a la luz visible de 460 nanómetros. Esta luz disocia la molécula de iodo en dos



7. PLATINAS CON CIRCUITOS ELECTRICOS para la simulación analógica de ecuaciones diferenciales estocásticas. La platina de la izquierda corresponde a la electrónica de acoplamiento del ruido o fluctuaciones externas con el sistema. La platina de la derecha es el "sistema real". (Foto cedida por Frank Moss.)

radicales activos que ocasionan la naturaleza fotosintética de la reacción.

Nos encontramos, pues, con un sistema muy útil para nuestro propósito: es muy sensible a la influencia de un parámetro externo (la intensidad de la luz), que es a la vez fácilmente controlable y reproducible incluso en su comportamiento estocástico. Para ello se recurre a un dispositivo ingenioso. El montaje experimental consta de una fuente de luz de intensidad graduable, que se hace pasar a través de una caja de paredes transparentes que contiene pequeñas bolas de poliestireno que danzan en una corriente turbulenta de aire. Este mecanismo sencillo produce un flujo de luz aleatorio que se aproxima a un proceso estocástico gaussiano, es decir, caracterizado por una distribución normal. Con este montaje se realizaron dos series de experimentos y se estudió el efecto de la intensidad de la luz y sus fluctuaciones. En la primera serie se mantuvo el flujo de luz constante (la caja transparente no contenía bolitas de poliestireno) y se observaba que el sistema experimentó un comportamiento biestable (podía optar entre dos estados diferentes) en función de la intensidad de la luz; se produjo también un ciclo de histéresis.

El fenómeno de la biestabilidad ocurre de la siguiente forma. Para pequeños valores de la intensidad de la luz, la mezcla química se mantiene uniforme. A medida que aumentamos la intensidad de la luz, y llegada ésta a cierto valor, siempre el mismo, el sistema exhibe un comportamiento oscilante que se observa con claridad midiendo la densidad óptica de la mezcla. ¿Qué ocurre, si desandamos el camino y vamos reduciendo la intensidad de la luz? Pues que el sistema no regresa a su estado inicial en el valor de intensidad que le indujo a abandonar dicho estado durante el proceso de ida, sino que ello ocurre a un valor menor. Ese es el fenómeno de histéresis.

En la segunda serie de experimentos se introdujeron fluctuaciones en la intensidad de la luz mediante el procedimiento descrito más arriba. Se observó ahora que el ciclo de histéresis se desplazaba a otra zona y se reducía su extensión. Pero éste sí es un efecto puro de las fluctuaciones externas, ya que el valor medio de la intensidad de la luz se ha mantenido con los mismos valores que en la serie primera de experimentos. Así, pues, las fluctuaciones han alterado el diagrama de fases de la reacción BR.

Veamos ahora algunos métodos prácticos para estudiar los sistemas sometidos a fluctuaciones. Cuando un investigador estudia un sistema real se encuentra con que la descripción formal del mismo (si la suerte o la habilidad le ha permitido alcanzar ya ese punto) viene dada por ecuaciones no lineales de muy difícil, si no imposible, solución la mayoría de las veces. Si a esta dificultad añadimos que el sistema contiene elementos aleatorios, entonces las cosas se complican mucho más. Como, por otra parte, estas dificultades no sirven de excusa y hay que obtener resultados, se siguen varios caminos o métodos prácticos. Lo habitual es comenzar por abordar el problema simplificando las ecuaciones en un proceso llamado de linearización, es decir, reduciéndolas a sistemas lineales; si los resultados conseguidos son acordes con la experiencia, se da por bueno el procedimiento. Si no es así, se profundiza un poco más en el cálculo, completándolo con la ayuda de un ordenador para realizar un cálculo numérico o bien una simulación del modelo. Este tipo de simulación del modelo recibe el nombre de simulación digital y tiene por objetivo explorar las propiedades del modelo y contrastar las predicciones de la teoría con bastante menos coste y mayor rapidez que la ejecución de un experimento real (por ejemplo, el estudio de una onda de choque a altísima velocidad sobre un fluido).

Otra vía paralela es hacer una simulación analógica. El proceso consiste en remplazar el sistema real (sus ecuaciones, mejor) por otro sistema real que obedece tales ecuaciones, pues así se ha construido. Se monta el sistema en cuestión mediante circuitos eléctricos que, en la mayoría de los casos, permiten mucha capacidad de maniobra y de control. Las fluctuaciones internas aparecen de forma natural debido al propio ruido de los componentes electrónicos. (Todos hemos oído alguna vez, en nuestros receptores, el ruido de fondo cuando no acaba de definirse la sintonía de una emisora.) Por su parte, las fluctuaciones externas se controlan fácilmente mediante dispositivos que reproducen las características estocásticas de las fluctuaciones [*véanse el cuadro B y las figuras 6 y 7*]. Los resultados que se obtienen son fácilmente procesables y se recaban así cualquier tipo de datos: valores medios, desviaciones relativas, densidades de probabilidad y tiempos característicos de un determinado proceso.

Una ventaja de esta simulación analógica es que reproduce fielmente el modelo deseado. Además, contiene sólo un pequeño grado de incertidumbre, característico de los sistemas reales; la simulación por ordenador carece de esa propiedad. Gracias a la simulación analógica podemos estudiar el comportamiento de reacciones químicas conocidas, láseres simples o complejos, cristales líquidos, etcétera. En estos sistemas puede observarse el efecto de agentes externos fluctuantes como serían la alimentación de un componente químico, el bombeo óptico o la variación de los campos magnéticos y eléctricos.

Como resumen general de este artículo, conviene dejar claros algunos puntos esenciales. Las fluctuaciones internas son inevitables en los sistemas naturales y, por tanto, hay que prestarles un mínimo de atención para no cometer errores en la interpretación de los resultados que puedan observarse. Si las fluctuaciones internas son pequeñas y nuestro sistema se encuentra en un estado estable, entonces su importancia es relativa y pueden despreciarse con tranquilidad. Si por el contrario nuestro sistema atraviesa por estados con cierta inestabilidad o metaestabilidad, entonces podemos observar fenómenos extraños desde un punto de vista determinista que únicamente podemos interpretar correctamente tomando en consideración la presencia de fluctuaciones.

En el caso de las fluctuaciones externas, la situación adquiere mayor relevancia, por cuanto, al ser controlables en el laboratorio, entonces nosotros mismos seremos capaces de inducir nuevos fenómenos de gran interés desde el punto de vista teórico y aplicado. En este caso se ha de elegir el tipo de fluctuaciones que se consideren más adecuadas en función del sistema en estudio [*véase el cuadro B*]. Sin embargo, la mayoría de las veces importa más la misma existencia de las fluctuaciones que las características específicas de las mismas.

Finalmente hay que asegurar que la presencia de las fluctuaciones o ruidos en un sistema, si bien puede ser molesta en algunos casos, y por ello hay que tratar de reducir su importancia relativa, en otros casos encierra un potencial importante de adquisición de nuevos conocimientos. En la bibliografía que se presenta existen más ejemplos en distintas áreas de la ciencia que pueden ayudar al lector interesado.

Lagartijas unisexuales: un modelo de evolución cerebral

Una especie de tejú, cuyos individuos son todos hembras, brinda una oportunidad única de contrastar las hipótesis sobre la naturaleza y evolución del comportamiento sexual

David Crews

El cortejo de la hembra por parte del macho constituye un capítulo imprescindible en la vida de la mayoría de los animales; de culminar con éxito, lleva a la cópula, asegurándose con ello la fecundación y la persistencia de la especie. Sin embargo, en la mayoría de los animales estudiados hasta el presente, el cortejo cumple una función anexa a la fecundación: estimula el desarrollo ovárico y la actividad reproductora de la hembra y multiplica la eficacia global de la reproducción. Por tanto, ¿qué de extraño tiene que una especie que carece de machos conserve un comportamiento de ese género?

Tal es el caso de una insólita especie de tejú, *Cnemidophorus uniparens*, que vive en el suroeste de Estados Unidos. La especie procede de un antepasado "bisexual" (con machos y hembras), pero es "unisexual" (carece de machos). Las hembras se reproducen por partenogénesis, es decir, por multiplicación sin fecundación, de modo que la cópula entre sus miembros no está relacionada de forma directa con la producción de descendientes. Sin embargo, esas hembras se entregan a prolongadas pautas de cortejo que son virtualmente idénticas a las observadas entre los machos y las hembras de otros tejúes.

¿Qué mecanismos facilitan la persistencia de semejante comportamiento en ausencia de machos? El cerebro, que controla el comportamiento sexual de machos y hembras, se ha adaptado en esa especie a un nuevo conjunto de estímulos, y media en el traspaso a las hembras de pautas de conducta normalmente asociadas a los machos. Lo cual reafirma la observación de que el cerebro está dotado de circuitos nerviosos para repertorios de conducta tanto masculinos como femeninos, con independencia del sexo biológico. Investigando de qué modo se ha llegado a ello, y valiéndome de las lagartijas unisexuales como modelo, me he formado una idea de la capacidad del cerebro para adaptarse a los cambios ambientales que se dan en el curso de la evolución.

Empecé a interesarme por el tema hace casi diez años, cuando estudiaba la influencia de las hormonas en el cortejo de los anolises [véase "El control hormonal del comportamiento de un lagarto", por David Crews; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1979]. Me habían enviado seis *C. uniparens* adultos y quería comparar sus ciclos hormonales con los de los machos y las hembras de anolis que había investigado durante varios años.

Mientras trabajaba en el laboratorio, di en ojear la jaula que albergaba a los tejúes y observé que dos individuos se estaban cortejando. La observación, accidental, me dejó intrigado. Durante varias semanas, el comportamiento se repitió en numerosas ocasiones, siempre con la misma pauta. Evidentemente no se trataba de un interacción al azar, sino de una conducta ritualizada en grado sumo. ¿Cómo explicarla? Parecía improbable que las hembras partenogenéticas dedicaran tanto tiempo y energía a una actividad carente de propósito definido. ¿Constituía ese comportamiento un vestigio inútil de la historia sexual de la especie, o quizá tenía alguna trascendencia biológica real?

Para dar respuesta a ese interrogante decidí comparar el comportamiento pseudosexual de esas lagartijas unisexuales con el sexual de sus parientes bisexuales más próximos. Tenía que hacerlo por dos razones: primera, quería determinar cuáles eran, de haberlas, las diferencias etológicas entre esas especies y qué cambios podrían haber sobrevenido con el tránsito de la bisexualidad a la unisexualidad; segunda, me interesaba averiguar si el cortejo entre los machos y las hembras de tejú desempeñaba alguna función ulterior a la de la inseminación. De ser así, daría pie a pensar en una función análoga para el cortejo observado entre hembras partenogenéticas.

Para poner a prueba la hipótesis, podíamos comparar el número de descendientes de las hembras que practicaban el cortejo con el de las que no lo practicaban. Si pudiera demostrarse que el cortejo entre hembras de la especie unisexual se traducía en un mayor rendimiento reproductor, trendría todo a mi favor para creer que no se trataba de un mero vestigio inútil del pasado, sino de una estrategia fundamententel para el éxito continuado de la especie.

Entenderemos mejor mediante qué mecanismos evolucionó la actividad pseudosexual entre hembras unisexuales si echamos un vistazo a los factores hormonales y neuronales que mediaron en ella. El cortejo está controlado por el sistema nervioso central: las hormonas sexuales sintetizadas por el macho y la hembra actúan directamente sobre ciertas áreas del cerebro y desencadenan la conducta típica del sexo correspondiente. ¿Por qué, en el transcurso de la evolución, se ha traspasado a la hembra el cortejo, conducta típica del macho y mediada por hormonas masculinas? Dos posibles explicaciones se apuntan como razonables: que los mecanismos que controlaban el comportamiento del macho en la especie antecesora bisexual persistieran, modificados quizá, en la descendencia, o que se creara un mecanismo nuevo y desconocido para controlar la conducta masculiniforme de las hembras unisexuales.

Varias características singulares convierten a los tejúes (del género *Cnemidophorus*) en sujetos idóneos para

una investigación de esta índole. El género cuenta con 45 especies; de ellas, 15 han sido identificadas como unisexuales femeninas, derivadas de bisexuales anteriores. Las especies bisexuales constan de machos y hembras en la habitual proporción de la mitad de cada, relación 1:1, y se reproducen sexualmente (como la inmensa mayoría de los vertebrados). Las unisexuales proceden de la hibridación de especies muy próximas y se componen sólo de hembras que se reproducen partenogenéticamente. Los descendientes de estas especies forman clones: grupos genéticamente idénticos a la madre y entre sí [véase "Lagartijas unisexuales" por Charles J. Cole; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1984].

Esas lagartijas unisexuales son fruto de una unión híbrida, formada por la fusión de gametos de dos especies anteriores, lo que posibilita identificar las dos antecesoras (es decir, parentales) y la descendiente (la unisexual) mediante técnicas moleculares. Se trata de una cuestión sutil, pero decisiva. La existencia de una especie ancestral brinda un grupo de control con el que comparar las estrategias reproductoras de la especie descendiente. Por comparación de las secuencias del ADN de diversos tejúes, Llewellyn D. Densmore III, Craig C. Moritz y Wesley M. Brown, de la Universidad de Michigan, establecieron que el antecesor materno de *C. uniparens* era la especie bisexual *C. inornatus*. Aunque no lograron identificar el paterno, la determinación de uno de los ancestros parentales bastaba para los propósitos de la investigación.

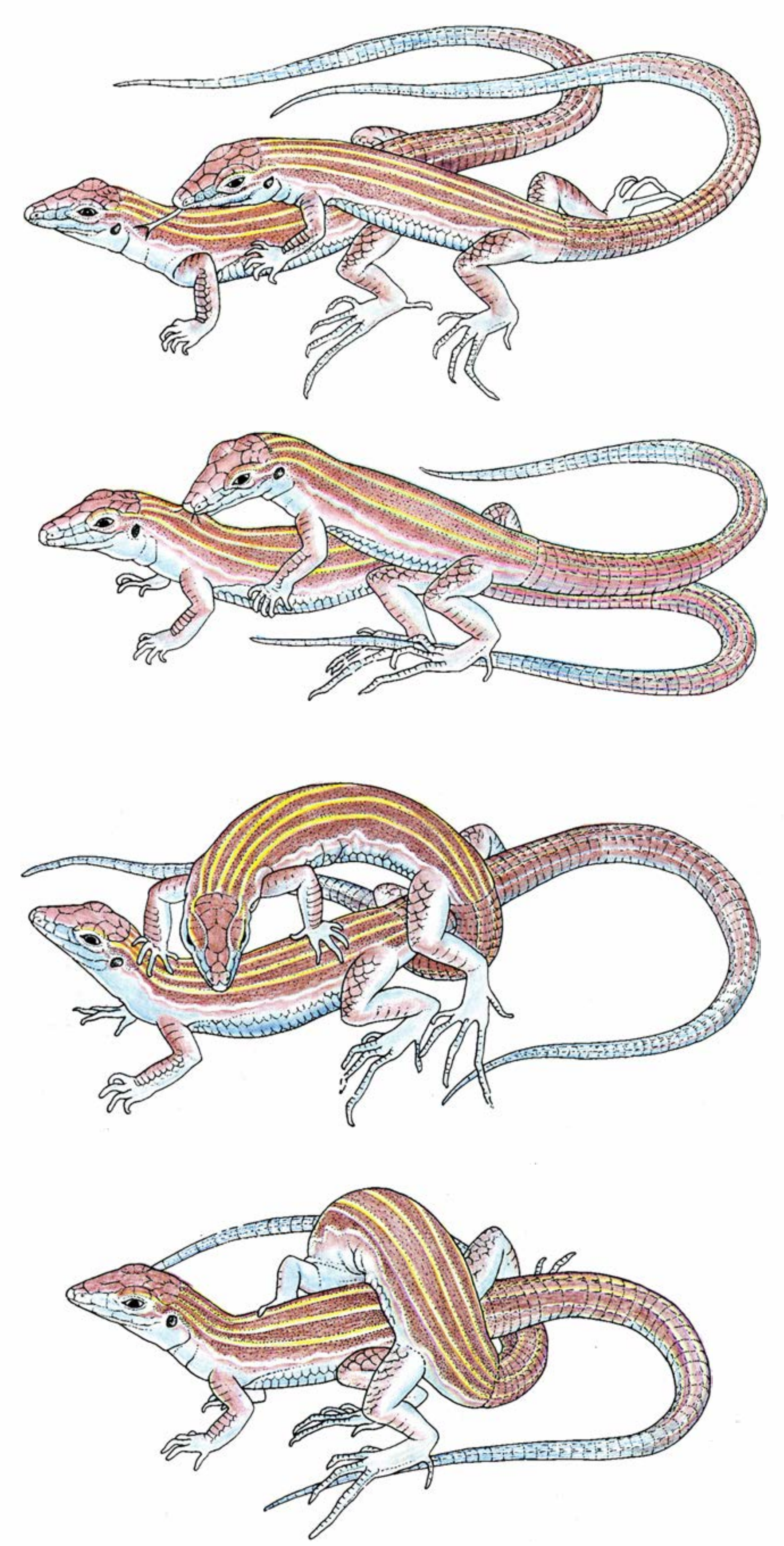
Empecé el análisis comparando el apareamiento de ambas especies. En *C. inornatus*, lo mismo que en *C. uniparens*, el cortejo sigue una serie de pasos bien definidos: el macho se aproxima a la hembra y le tienta el cuerpo con la lengua; si está sexualmente receptiva, la ase con las mandíbulas por la piel del cuello o una de las patas delanteras. Tal acto parece tranquilizar a la hembra y permite al macho subirse al dorso. Una vez montado, rasca los flancos de la hembra con las extremidades anteriores y posteriores y presiona su cuerpo contra el sustrato. Al cabo de unos minutos, el macho maniobra con la cola por debajo de la de su compañera hasta que su cloaca entra en contacto con la de ella.

Durante el apareamiento, uno de los dos hemipenes de la lagartija (al igual que las serpientes, las lagartijas tienen un par de penes) penetra en la abertura genital de la hembra. Con la inserción, el macho transfiere la presión mandibular del cuello de la hembra a la región pélvica, adoptando una posición retorcida que he denominado postura en rosquilla. Permanece de ese modo entre cinco y diez minutos, durante los cuales se produce la eyaculación. Desmonta luego rápidamente y abandona a la hembra.

Los miembros de la especie unisexual descendiente, *C. uniparens*, muestran un ritual de cortejo casi idéntico, con la salvedad de que unas hembras adoptan el papel de machos (califico



1. ***CNEMIDOPHORUS UNIPARENS*, del suroeste de Estados Unidos, es una de las 15 especies de ese género reptiliano de las que se sabe que están constituidas sólo por hembras. Pese a que se reproducen por multiplicación sin fecundación, en seis especies se han observado hembras que practican el cortejo masculino.**



2. RITUAL DE CORTEJO entre las hembras de la especie unisexual *C. uniparens*, casi idéntico al desplegado por su antepasado bisexual *C. inornatus*. El "macho" (la hembra que exhibe el comportamiento masculiniforme) se aproxima a una hembra que presente comportamiento típicamente femenino (*arriba*) y la tienta con la lengua. Si la encuentra receptiva, la cubre (*segunda imagen*), mientras la agarra por la piel del cuello. Al cabo de unos minutos, el "macho" desliza su cola por debajo de la cola de la hembra (*tercera imagen*), movimiento que pone en contacto sus respectivas aberturas cloacales. Acto seguido, el "macho" desplaza el mordisco a la región pélvica de la hembra (*abajo*), adoptando la característica postura en rosquilla. El proceso entero, conocido asimismo como pseudocópula, dura entre cinco y diez minutos.

este comportamiento de masculiniforme), mientras otras proceden como hembras típicas. Las hembras masculiniformes se aproximan y montan a las sexualmente receptivas, asiéndolas con las mandíbulas; a los pocos minutos, doblan la cola por debajo de la de su compañera y desplazan el apretón mandibular para adoptar las característica postura en rosquilla (doy a este comportamiento el nombre de pseudocópula). La única diferencia entre la pseudocópula y la cópula verdadera es que las lagartijas unisexuales son morfológicamente hembras (carecen de hemipene) y, por tanto, no puede haber penetración.

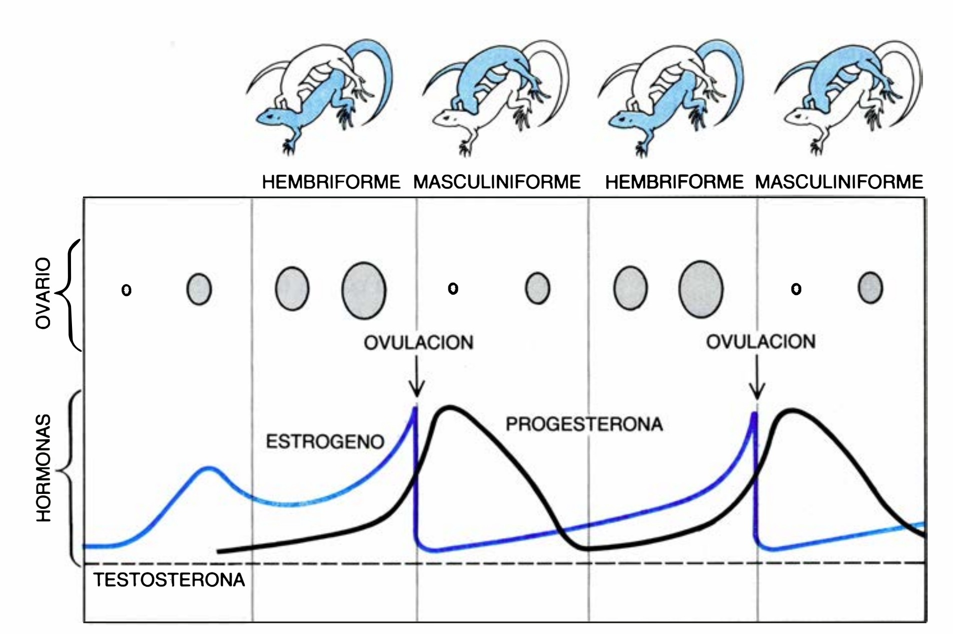
Una vez establecido que las paradas de cortejo de los dos tejúes son prácticamente idénticas, había que precisar qué influencia podía tener el cortejo sin inseminación sobre la reproducción. En muchas especies, incluido el ser humano, el cortejo ejerce un efecto de primera magnitud: sirve para sincronizar las respectivas fisiologías reproductoras del macho y la hembra y para regular el desarrollo ovárico normal de la hembra. Si conseguía pruebas de que el cortejo del macho estimulaba el desarrollo ovárico en *C. inornatus*, tendría razones para imaginar un fenómeno análogo en *C. uniparens*, salvo que las hembras sustituirían a los machos.

Junto con Jonathan K. Lindzey —alumno de licenciatura de mi laboratorio— empecé a examinar las tasas de ovulación de hembras de *C. inornatus* criadas en tres condiciones distintas: en solitario, con otras hembras o con machos. Los resultados concordaban con los hallados en otros vertebrados: las hembras no ovulaban en solitario; enjauladas con otras de su sexo, eran contadas las que lo hacían, y producían muy pocos huevos. En cambio, en presencia de machos, sus ovarios maduraban mucho más deprisa: la ovulación era más frecuente y, la producción total de huevos, mayor. Ello suponía un hallazgo capital: los resultados indicaban con toda claridad que, en la especie antecesora, el cortejo constituía una poderosa fuerza fisiológica, decisiva para el éxito reproductor de la especie.

Deseaba comprobar si en *C. uniparens* operaba un efecto fisiológico similar. En su hábitat natural, en el curso de una temporada de reproducción (que dura de abril a mediados de verano) la hembra de esta especie deja dos o tres puestas, de dos o tres huevos cada una. Pude demostrar, con ayuda de Jill E. Gustafson —alumno de mi laboratorio— que las hembras criadas en

solitario sólo llegaban a las 0,8 puestas de promedio durante la época de reproducción, mientras que las criadas en presencia de otras hembras sexualmente activas (con las que practicaban la pseudocópula) triplicaban de lejos esa cifra, con un promedio de 2,5 puestas en un período idéntico.

Se demostraba así que el cortejo potenciaba la reproducción tanto en las lagartijas bisexuales como en las unisexuales. Pero, seguía en pie un interrogante de la mayor importancia: ¿qué mecanismo fisiológico subyacente controlaba la actividad sexual en esas especies? Respondida esa pregunta, sabríamos si las hormonas responsables de la conducta de *C. inornatus* eran también las que desencadenaban el comportamiento masculiniforme de *C. uniparens*. A su vez, ello nos permitiría comprender el papel del cerebro en el comportamiento sexual y su evolución ante la unisexualidad.



3. ACTIVIDAD SEXUAL de *C. uniparens*; fluctúa en consonancia con el ciclo ovárico. Las hembras que se encuentran en fase preovulatoria presentan un comportamiento hembriforme; las que están en fase postovulatoria manifiestan una conducta masculiniforme. El cambio de papeles sexuales, de femenino a masculino, viene mediado por la alteración de las concentraciones de las hormonas sexuales en circulación: las concentraciones altas de estrógeno se asocian con el comportamiento hembriforme; una disminución brusca del estrógeno (después de la ovulación) y un aumento rápido de la progesterona se asocian con el tránsito al comportamiento masculiniforme. En la época de reproducción, el ciclo se repite dos o tres veces.

Comencé por comprobar la reacción de las hembras de *C. uniparens* ante concentraciones elevadas de las hormonas sexuales masculinas testosterona y dihidrotestosterona (que constituyen el grupo de los andrógenos). Extirpé los ovarios de esas lagartijas (la fuente principal de hormonas sexuales en las hembras) y luego les administré andrógenos. Descubrí de ese modo que podía inducir sistemáticamente un comportamiento masculiniforme en las hembras sin ovarios. Aunque pueda parecer extravagante (los andrógenos suelen sintetizarse en los testículos), las consecuencias eran interesantes. Si las hormonas masculinas eran las verdaderas responsables del comportamiento masculiniforme, el perfil hormonal de esas hembras debía haber cambiado radicalmente en el transcurso de la evolución. ¿Habían adquirido los ovarios, que por regla general producen hormonas sexuales femeninas, la función de los testículos? ¿Producían hormonas masculinas para compensar la ausencia de machos? Probar semejante hipótesis exigía una minuciosa investigación de la base fisiológica de la actividad sexual de ambas especies, la unisexual y la bisexual.

Emprendí esa tarea trazando un calendario del ciclo ovárico, punto focal de la reproducción en las hembras y proceso mediante el que se producen los huevos. Ya habíamos establecido, a partir de la producción de huevos, que las hembras de *Cnemidophorus* experimentaban dos o tres ciclos ováricos separados (cada uno de aproximadamente tres a cuatro semanas de duración) en los tres o cuatro meses que abarca la época de reproducción. Cada ciclo podía dividirse en dos fases distintas: la folicular, o preovulatoria, y la luteal, o postovulatoria. Durante la fase folicular se deposita en los folículos —que alcanzan un diámetro máximo de diez milímetros en seis u ocho días— el vitelo necesario para el desarrollo del embrión. La fase luteal sucede a la ovulación cuando se forman en el ovario los cuerpos lúteos (vestigio de los folículos) y los óvulos pasan a los oviductos. Una vez en ellos, se envuelven de una cáscara dura y, a los siete o catorce días de la ovulación, se depositan.

Definido ya el ciclo ovárico, había que compararlo con las fluctuaciones de la actividad sexual. Lindzey descubrió que las hembras de la especie ancestral, *C. inornatus*, sólo se mostraban receptivas a los machos durante la fase folicular, preovulatoria. Durante la luteal, postovulatoria, rechazaban agresivamente los requerimientos de los machos. En *C. uniparens* hallamos una pauta de actividad análoga. El comportamiento femenino sólo se expresaba en hembras en fase preovulatoria, mientras que el masculiniforme aparecía, de forma sistemática, en hembras que habían ovulado en fecha reciente y estaban en fase postovulatoria.

Lo mismo que la actividad sexual, las pautas de la secreción hormonal variaban en consonancia con el ciclo ovárico. Las hormonas femeninas —estrógeno y progesterona (producidas, respectivamente, por los folículos y los cuerpos lúteos)— fluctuaban en estas lagartijas como en la mayoría de las hembras de vertebrados. Michael C. Moore, becario de postdoctorado de mi laboratorio, encontró que, en ambas especies, la concentración de estrógeno en circulación aumentaba durante la fase folicular y llegaba al máximo en el momento de la ovulación. La concentración de progesterona, baja durante la mayor parte de la fase folicular, alcanzaba su valor más elevado en la luteal y declinaba rápidamente cuando se resorbían los cuerpos lúteos, en los siete a diez días siguientes. Una semana después comenzaba un nuevo ciclo. Las semejanzas advertidas entre los ciclos del estrógeno y de la progesterona en las dos especies indicaban que sus perfiles hormonales habían permanecido estables en el transcurso de la evolución.

Contrariamente a lo que esperaba por los resultados de mi primer experimento con hembras sin ovarios, descubrimos que, en las hembras masculiniformes, las concentraciones de hormonas sexuales masculinas en circulación eran uniformemente bajas y, en la mayoría de los casos, no pudieron detectarse con nuestras técnicas de radioinmunoensayo. No había indicio alguno, ni siquiera durante o después de la pseudocópula, de un aumento transitorio de la concentración. A lo largo del ciclo reproductor de *C. uniparens*, las concentraciones de andrógenos fueron, al menos, mil veces inferiores a las características de los machos de *C.*

inornatus sexualmente activos. Aunque ello apuntaba a que los perfiles hormonales del tejú unisexual femenino no se habían alterado de manera profunda, no lograba explicar por qué la administración de andrógenos disparaba el comportamiento masculiniforme en las hembras cuyos ovarios habían sido extirpados.

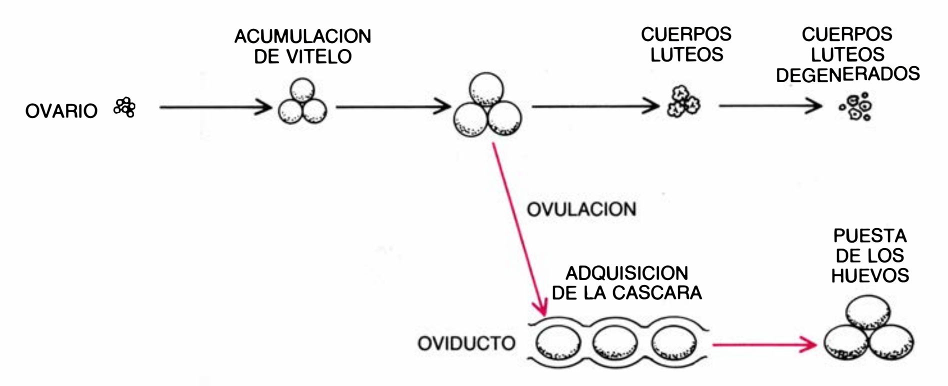
El análisis de los machos de *C. inornatus* revela que sus niveles de testosterona y de dihidrotestosterona son normales. Cuando comienza la actividad sexual durante la primavera y el inicio del verano, aumenta la concentración de ambas. Esas concentraciones se elevan significativamente cuando las hembras despiertan del letargo invernal, unas dos semanas después de hacerlo los machos; dicha correlación indica que la presencia de las hembras aumenta las concentraciones hormonales en los tejúes machos. De igual modo, las concentraciones de hormonas femeninas –estrógeno y progesterona– son bajas, de conformidad con lo hallado en la mayoría de los machos de especies bisexuales.

Tenía aún que demostrar que las hormonas testiculares controlaban el cortejo y la cópula en los machos de *C. inornatus*. Con ese propósito, Lindzey y yo extirpamos quirúrgicamente los testículos a un grupo de machos sexualmente activos y metimos a éstos en jaulas junto con hembras sexualmente receptoras. Los resultados no se prestaban a ambigüedades: los machos castrados cortejaban a las hembras con una frecuencia bastante menor que los intactos. Además, administrando hormonas sexuales a los machos castrados, obtuvimos pruebas directas de que el declive de la actividad sexual estaba vinculado a la pérdida de las hormonas segregadas por los testículos. Los que recibieron hormonas renovaron la actividad cortejadora de hembras sexualmente activas.

Hicimos entonces un descubrimiento de especial interés. Algunos machos castrados y tratados con progesterona reaccionaban igual que cualquier macho ante los andrógenos: ambos grupos se mostraban sexualmente activos y copulaban con la misma frecuencia. Más adelante observamos que las hormonas desencadenaban también una reacción idéntica en machos a punto de concluir la temporada de reproducción. Por lo común, el comportamiento cortejador menguaba notablemente en esa época, pero los machos a los que se había administrado un andrógeno o progesterona seguían exhibiendo una elevada actividad sexual en presencia de hembras.

El interés de esos hallazgos respondía a dos razones. Primero, eran diametralmente opuestos a lo que se ha encontrado en mamíferos y aves (en esos animales, la progesterona constituye un potente inhibidor de la actividad sexual de los machos; en estas lagartijas, la estimula); y segundo, parecían indicar que tal sensibilidad a la progesterona femenina podía haber constituido la plataforma para la evolución de la pseudocópula en los tejúes unisexuales.

Con todo, la pseudocópula seguía resultando un misterio. Sabíamos que la desaparición de los machos de *C. uniparens* había ido acompañada de una pérdida significativa de testosterona y dihidrotestosterona, pero ignorábamos qué las había sustituido en la regulación del comportamiento masculiniforme. La persistencia del cortejo masculino indicaba que, pese al cambio de hormonas, se habían conservado los circuitos neuronales subyacentes al comportamiento del macho.



4. CAMBIOS SECUENCIALES que sufren los ovarios de los tejúes en el transcurso del ciclo ovárico. Al principio los ovarios son pequeños, pero aumentan progresivamente de volumen a medida que los óvulos de su interior se desarrollan y adquieren grandes cantidades de vitelo. Cuando los óvulos están maduros, pasan a los oviductos (tránsito que recibe el nombre de ovulación), donde, en un proceso que tarda entre siete y 14 días, adquieren una cáscara dura. Durante este período, los cuerpos lúteos degeneran y se resorben y los ovarios se ponen a punto para una nueva ronda de producción de huevos. El ciclo completo, que se prolonga de tres a cuatro semanas, se repite a los pocos días de producirse la primera puesta de huevos.

Sabíamos que los andrógenos desencadenaban el cortejo en los machos de *C. inornatus*, pero no encontrábamos indicios de testosterona o dihidrotestosterona en ninguna de las fases del ciclo ovárico de *C. uniparens*. Por tanto, sospechamos que la conducta masculiniforme de esa especie la desancadenaba otra señal, muy posiblemente una hormona producida por el ovario. Varias razones lo apuntaban así. Nunca se había observado pseudocópula en hembras reproductivamente inactivas o a las que se les hubiera extirpado los ovarios. Además, el ciclo ovárico definía con precisión los comportamientos femenino y masculiniforme: el femenino se limitaba a la fase folicular; el masculiniforme, a la luteal.

En muchos animales, los cambios del comportamiento sexual se corresponden con cambios hormonales. En estas lagartijas, durante la transición de la conducta femenina a la masculiniforme, las concentraciones de estrógeno en circulación son inferiores en un factor de tres al valor original, mientras que las de progesterona se multiplican por un factor de nueve. ¿Acaso desempeñaba ese salto brusco de la concentración hormonal alguna función crucial para la expresión del comportamiento pseudosexual? Mark Grassman –becario de posdoctorado de mi laboratorio– y yo formulamos la hipótesis de que así era. Postulamos que la progesterona podía ser el estímulo endógeno responsable del comportamiento masculiniforme; y el estrógeno, el correspondiente al femenino.

Además, conjeturamos que, para que la pseudocópula constituyera una estrategia reproductora eficaz, debía darse complementariedad, es decir, en todo momento de la época de reproducción, unas hembras debían estar en fase folicular y otras en fase luteal. Verificamos ese extremo extirpando los ovarios a varias hembras e implantándoles cápsulas que contenían estrógeno, progesterona o nada. Emparejándolas en diferentes combinaciones y controlando la actividad sexual resultante, correlacionamos el comportamiento con las hormonas específicas.

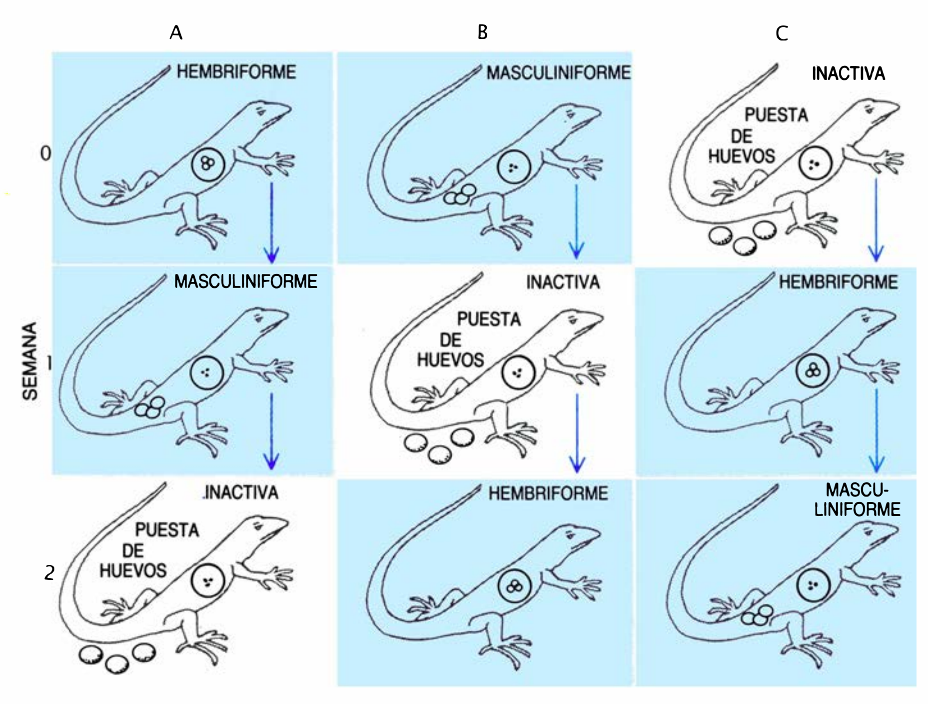
Los resultados no dejaban lugar a dudas. Cuando las hembras que recibían progesterona se emparejaban con las que recibían estrógeno, seguíase el comportamiento pseudocopulador; las primeras desempeñaban sistemáticamente el papel de machos y, las segundas, el de hembras. Las parejas en las que un individuo recibía una cápsula vacía y el otro una de progesterona o estrógeno no manifestaban actividad

sexual. Con anterioridad, el autor había establecido que los individuos alojados juntos organizaban y mantenían esa complementariedad de su estado reproductor. Mediante la alternancia de los papeles sexuales, maximizaban la fecundidad e incrementaban la eficacia reproductora.

Los resultados de esos experimentos se avienen perfectamente con las ideas al uso acerca de la capacidad del cerebro para amoldarse a las influencias hormonales. A menudo se ha dicho que, en primera instancia, el cerebro es bisexual y que adquiere el dimorfismo sexual en un estadio posterior del desarrollo. Queríamos ahondar más en esa idea, convencidos de que terminaríamos por resolver el misterio del cortejo sexual.

Sabíamos, por investigaciones realizadas en invertebrados bisexuales, que en el comportamiento sexual entre machos y hembras median dos circuitos neuronales distintos: uno ocupa el área cerebral anterior preóptica del hipotálamo (AH-POA) y controla el cubrimiento y la cópula del macho; el otro se extiende por el hipotálamo ventromediano (VMH) y controla la receptividad sexual de la hembra. Además, ambas regiones tienen receptores para la correspondiente hormona sexual masculina o femenina.

¿Se da también esa distinción en las lagartijas unisexuales? Con la ayuda de Mark Mayo y Judi Wade, alumnos de mi laboratorio, intenté determinar qué áreas del cerebro controlan el comportamiento femenino y masculiniforme de *C. uniparens*. Procedimos a implantar ínfimas cantidades de hormonas sexuales en el cerebro de individuos sexualmente inactivos (les habíamos extirpado quirúrgicamente los ovarios). Los resultados fueron concluyentes. Los andrógenos y la progesterona implantados en la AH-POA activaban el comportamiento pseudosexual masculiniforme (pero no el estrógeno); y a la inversa, el estrógeno implantado en la VMH estimulaba el comportamiento femenino típico de la hembra (pero no el andrógeno ni la progesterona).



5. COMPLEMENTARIEDAD del ciclo ovárico de las hembras de *C. uniparens* que posibilita el cortejo. Durante la época de reproducción, las hembras sincronizan su actividad de suerte que unas estén en fase preovulatoria y otras en fase postovulatoria. Se ha representado aquí ese hecho en tres hembras cuyo comportamiento se estuvo observando durante varias semanas. A medida que una hembra pasa del estado de preovulación (representado por el engrosamiento de los ovarios) al de postovulación (indicado por la presencia de óvulos en el oviducto), su conducta conmuta de hembriforme a masculiniforme. Puesto que las lagartijas se encuentran reproductivamente desfasadas (cuando una es hembriforme, su pareja es masculiniforme), durante la época de reproducción la actividad cortejadora no cesa. Las hembras sexualmente inactivas (las que acaban de poner huevos) recuperan el comportamiento hembriforme al comienzo del siguiente ciclo ovárico. Figuran en color los individuos que practican el cortejo mutuo la misma semana.

De este modo supimos que los circuitos nerviosos que median en la conducta de *C. uniparens* eran los mismos que controlan la conducta sexual de los vertebrados bisexuales. Nuestra hipótesis era que la progesterona podía estimular el comportamiento masculino en la AH-POA, uniéndose a los receptores androgénicos presentes en los circuitos neuronales. Puesto que esos animales carecen prácticamente de andrógeno, sería escasa la competencia por los centros de unión y la progesterona se fijaría con facilidad.

Los experimentos que Lindzey y yo hemos realizado junto con Kathleen Matt, de la Universidad estatal de Arizona, en lagartijas bisexuales indican que así es. Mediante progesterona y andrógenos marcados radiactivamente comprobamos que la primera puede desplazar de los receptores hormonales de la AH-POA al andrógeno. Con todo, los experimentos, meramente indicativos, no demostraban de modo irrefutable que la progesterona se fijara en los receptores androgénicos del cerebro de las hembras de *C. uniparens*.

Hay que tomar en consideración otros posibles mecanismos mediante los cuales las hembras podrían expresar un comportamiento masculiniforme. Uno sería que, tras su entrada en el cerebro, la progesterona se convirtiese en andrógeno. Ello es improbable, porque hemos descubierto recientemente que la R5020, un equivalente sintético de la progesterona que no puede transformarse en andrógeno en el cerebro, estimula el comportamiento sexual en machos castrados de *C. inornatus*. Otra posibilidad sería que la progesterona se fijara en receptores progesterónicos vinculados funcionalmente a la AH-POA. Pero también eso resulta inverosímil, pues supondría que existe una diferencia fundamental entre los receptores progesterónicos de los tejúes y los de los demás vertebrados investigados.

Mediante disección de los elementos del comportamiento pseudosexual de una especies unisexual de tejú hemos demostrado cómo puede conservarse un comportamiento decisivo para el desarrollo ovárico y el éxito reproductor cuando cambian las condiciones bajo las que se produjo la evolución original. En el caso de *C. uniparens*, la desaparición de los machos entrañó la pérdida de las hormonas masculinas que, en condiciones normales, controlan la conducta de apareamiento típica de ese sexo. A pesar de ello, y para cubrir nuevas funciones en ausencia de los machos, persistió el comportamiento masculiniforme en la lagartija unisexual, y ello merced a que se asimilaron determinadas características del cerebro del antepasado, *C. inornatus*; a saber, la presencia de dos circuitos nerviosos que median en el comportamiento típico de los machos y las hembras y la sensibilidad de sus receptores androgénicos a la progesterona. El cortejo entre hembras ha aportado nuevos datos acerca de la evolución etológica y de los medios de que se valen los mecanismos neuroendocrinos que controlan la adaptación del comportamiento a las variaciones del ambiente.

Ciencia y sociedad

Darwinismo neuronal

El cerebro posee mapas donde se representa la información sensorial; cuando se estimula un determinado receptor, por ejemplo una célula retiniana, se desencadena la respuesta de un área, específica y muy localizada, de células cerebrales. La cartografía global se ajusta a un patrón genético, pero sus detalles responden a las primeras experiencias vividas y pueden evolucionar con los años. ¿A qué modelo de interconexión se ajustan esos mapas, tan estructurados y a la vez flexibles?

Según la teoría propuesta por Gerald M. Edelman, de la Universidad de Rockefeller, el cerebro posee capacidad para representar un número ingente de cosas, pero selecciona sólo aquellas con las que ha tenido alguna experiencia. Se explica tal selección, afirma Edelman, si la unidad elemental de organización cortical no es la neurona, sino un "grupo neuronal". Las células del grupo deciden, "por votación", si representan un área determinada de receptores sensoriales, el así llamado campo receptor. Por desgracia, si existen, esos grupos de neuronas sólo medirían unos 50 micrometros de anchura, demasiado poco para estudiarlos con los métodos al uso. Por esa razón, Edelman, Leif H. Finkel y John C. Pearson se han valido de simulaciones por ordenador para analizar cómo podría, una red de características anatómicas y bioquímicas verosímiles, generar espontáneamente grupos neuronales. Se describen esos trabajos en *The Journal of Neuroscience* y en el libro de Edelman *Neural Darwinism*.

Edelman y sus colegas han modelizado parte del córtex somatosensorial; las señales que llegan a esa área procedentes de nervios sensoriales de la piel conservan las relaciones anatómicas. Por ejemplo, el grupo de neuronas que responden cuando se toca el dedo índice se encuentra entre los de las correspondientes al pulgar y al cordial. En su simulación, los científicos modelaron matemáticamente una capa de células corticales que están conectadas a la superficie de la mano. Cuando se estimula un receptor de ésta, emite señales excitadoras a la largo de "nervios" que se desparraman hacia un grupo de células corticales densamente interconectadas.

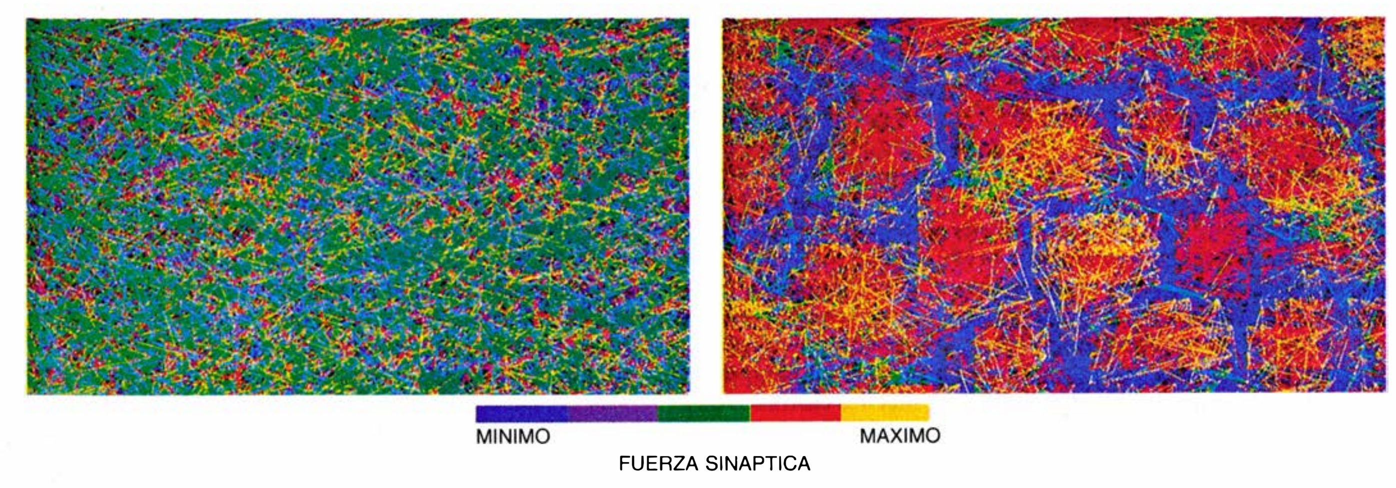
En la simulación se modifica la eficacia con que se transmiten las señales entre neuronas —su "intensidad sináptica"— en función de la actividad de la red. Tras repetidas experiencias, se intensificarán algunas sinapsis y se reforzarán ciertas pautas de actividad. La norma de modificación sináptica empleada en la simulación dicta que la intensidad de una sinapsis crece cuando coinciden un estímulo de la sinapsis con la emisión hacia ella de otros muchos impulsos procedentes de las restantes sinapsis de la célula.

Se inician las simulaciones dotando a las sinapsis de intensidades aleatorias. Cuando se "toca" la mano, un racimo de receptores envía señales a un grupo de células corticales. Allí, las neuronas que reciben impulsos y que además se encuentran estrechamente interconectadas se ven involucradas en un circuito de retroalimentación positiva que refuerza sus conexiones; se crean de ese modo agrupaciones de células sólidamente conectadas. Las neuronas que no reciben el estímulo a la vez, o que carecen de conexiones suficientes con el grupo, no se suman al racimo. Por un proceso análogo, los grupos desarrollan una intensa conexión con un campo receptor particular.

Es de destacar que las representaciones corticales simuladas se parecen mucho a las observadas en los animales, en particular por Michael Merzenich, de la Universidad de California en San Francisco. Así, la simulación produjo grupos que eligieron un campo receptor situado, bien en la palma, bien en el dorso de la mano, aunque todas las células recibían igual número de conexiones nerviosas procedentes de ambas caras. Si se golpeaba repetidamente un dedo, crecía el tamaño y el número de los grupos que lo representaban. Si se lesionaba algún "nervio", se inactivaban algunos grupos y otros pasaban a representar un área distinta de la mano.

En fase

La cristalografía por rayos X, que permite conocer la estructura atómica de la materia cristalina a partir de la difracción de dicha radiación, resulta indispensable, a pesar de la extrema dificultad que entraña, en el estudio de las moléculas orgánicas complejas. Apoyándose en la misma, y tras años de analizar muestras cristalinas, un equipo de seis científicos de las universidades de Harvard y Stanford han logrado resolver la retorcida estructura del antígeno de histocompatibilidad HLA-A2, molécula de importancia decisiva en el sistema inmunitario.



*1. TUPIDA RED DE CONEXIONES de intensidades aleatorias en la que participan las 1536 neuronas de un córtex simulado por ordenador (**izquierda**). Los estímulos procedentes de una "mano" provocan en la red la formación de agrupaciones de células fuertemente interconectadas, rodeadas de fosos en azul claro de conexiones débiles (**derecha**)*

El problema principal consiste en extraer información tridimensional a partir de las manchas producidas por el choque de haces difractados contra una película u otro medio de detección. La intensidad de las manchas y la posición que ocupan en la película revelan datos sustanciales sobre la identidad y la ubicación de los átomos que han difractado el haz. Sin embargo, para trazar un modelo preciso del cristal, debe también conocerse la fase (cresta, valle o punto intermedio) de la onda en su lugar de impacto contra la película.

Una técnica desarrollada por Roberto Colella, de la Universidad de Purdue, y Qun Shen, de la de Cornell, quizá brinde a los especialistas una útil herramienta para determinar esa fase. Ambos científicos le han sacado partido a un fenómeno que los cristalógrafos conocen bien: si se dispone un cristal con cierta orientación, el haz se difracta simultáneamente en dos planos internos del cristal en vez de en uno solo, escindiéndose en dos haces solapados.

En la realización del ensayo, Colella y Shen orientaban primero el cristal para obtener un solo haz difractado; seguidamente lo rotaban hasta la posición en la que se escinden los dos haces. Si éstos se encontraban en fase (esto es, cresta con cresta y valle con valle), se reforzaban mutuamente y las manchas que producían en la película ganaban brillo; si se encontraban desfasados, se anulaban y las manchas palidecían o desaparecían incluso. Midiendo el cambio, se calculaban las fases relativas mutuas de los dos haces solapantes; repitiendo el procedimiento con otras direcciones, se obtenía suficiente información para revelar la estructura tridimensional del cristal.

Desde hace décadas se conocen las posibilidades teóricas de la explotación de la difracción en múltiples haces, pero ha habido que esperar a los recientes avances registrados por las fuentes sincrotrónicas de rayos X y por los ordenadores encargados de analizar los datos para ensayar el procedimiento. Y habrá que esperar aún mejoras ulteriores: hasta la fecha el método sólo ha servido para analizar moléculas orgánicas pequeñas, como la bencina. Según opinan otros científicos, esos refinamientos permitirían aplicar el ensayo al sondeo de moléculas que se resisten a las dos técnicas analíticas más comunes hoy.

En uno de esos procedimientos, la sustitución isomorfa, se inserta en la molécula un átomo pesado, por ejemplo, de oro o plomo. Los rayos X fuertemente difractados por los átomos pesados entran en interferencia con (es decir, modifican su fase) los rayos X difractados por los átomos orgánicos (por regla general hidrógeno, oxígeno y carbono), más ligeros. Se deduce la posición de los átomos ligeros "decorando" la misma molécula con distintos átomos pesados y comparando luego los respectivos patrones de interferencias.

En los denominados métodos directos, desarrollados a finales de la década de 1950 por Jerome Karle, del Laboratorio Naval de los Estados Unidos, y Herbert A. Hauptman, de la Fundación Médica de Buffalo, la fase se determina por procedimientos estadísticos. En ese análisis se explotan las relaciones que guardan entre sí las manchas producidas sobre una película al girar un cristal; por ejemplo, si las coordenadas espaciales de tres manchas de intensidades similares se anulan al sumarlas, sus fases deberían cancelarse. Karle, que compartió con Hauptman el premio Nobel en 1985, advierte que, puesto que en los métodos directos se hace uso de la teoría de probabilidades, de vez en cuando dan resultados erróneos. "Ayudaría mucho", afirma Karle, que los métodos directos pudieran complementarse con datos "definitivos" obtenidos en ensayos de haces múltiples.

Karle señala, además, que los métodos directos no pueden revelar de modo fiable la estructura de moléculas que consten de más de un centenar de átomos. Por el contrario, la sustitución isomorfa sólo sirve para moléculas formadas por más de unos 400 átomos constituyentes; resulta difícil que las moléculas menores absorban átomos pesados y en el empeño a veces se provoca la distorsión de la estructura. Si Colella y Shen logran aplicar su técnica experimental a moléculas de la "ventana" intermedia, "se habría dado un gran paso adelante", comenta Karle.

Complejo cósmico

Las dimensiones de nuestra ubicación cósmica no dejan de crecer. La astronomía comenzó cartografiando el entorno inmediato de la Tierra: el Sistema Solar. A principios de siglo se comprobó que nuestro sistema habita en una isla espiraliforme de estrellas, la Vía Láctea. Algo más tarde se descubrió que ésta constituía, junto con otra veintena de galaxias, el Grupo Local. En el pasado decenio se conoció que el Grupo Local reside cerca del borde del Supercúmulo Local, una hoja de galaxias distribuidas desigualmente que mide unos 100 millones de años luz, vecino del Supercúmulo Hidra-Centauro y quizá de una vasta concentración de galaxias: el Gran Atractor [véase "El grandioso desfile de las galaxias", por Alan Dressler; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 1987].

R. Brent Tully, de la Universidad de Hawai en Manoa, informa ahora en *The Astrophysical Journal* que el Supercúmulo Local y sus vecinos pertenecen a un "complejo" mucho mayor de supercúmulos. Tal estructura es, con gran diferencia, la mayor delineada hasta la fecha: su diámetro alcanza los 1000 millones de años-luz, por lo menos, una décima parte del universo observable, y 200 millones de años-luz de grosor. Su masa estimada es de 10^{18} veces la del Sol. Tully ha bautizado esa estructura Complejo de Supercúmulos Piscis-Ballena, pues, observada desde la Tierra, parece concentrarse en las constelaciones de Piscis y de la Ballena.

Vera C. Rubin, de la Institución Carnegie de Washington, juzga el informe "muy sugestivo", a la vez que señala la necesidad de nuevas observaciones para corroborarlo. "Se trata de trabajos muy difíciles, que requieren mucho temple", afirma Rubin. Tully cartografió cúmulos galácticos, formados por alrededor de 1000 galaxias cada uno, que, en la década de 1950, había observado y catalogado George Abell. Estimó las distancias a que se hallaban los cúmulos sirviéndose de mediciones recientes de sus corrimientos hacia el rojo. (Según se supone, el grado con que la luz procedente de una galaxia aparece corrida hacia el extremo rojo del espectro es aproximadamente proporcional a la distancia que la separa de la Tierra.)

Tully confinó su mapa en una esfera cósmica de un radio de 1000 millones de años-luz centrada en la Vía Láctea; las observaciones de las galaxias situadas fuera de la esfera resultan, según dice, "terriblemente incompletas". Al representar las posiciones que ocupan los cúmulos de Abell, Tully advirtió que en su mayoría se agrupaban en cinco estructuras que sólo ocupaban el 0,5 por ciento del volumen de la esfera. En el centro de ésta se aloja el Complejo de Supercúmulos Piscis-Ballena. En las vecindades flotan otros dos complejos de supercúmulos de tamaño comparable, que Tully denomina Hércules-Corona Boreal y Acuario. Los dos complejos restantes, Leo y Osa Mayor, son menores y se hallan cerca del perímetro de la esfera.

Antes incluso del informe de Tully, los cosmólogos ya encontraban dificultades para explicar la presencia de densos agregados de galaxias rodeados de vastas regiones sin materia visible.

"Siempre hemos creído, afirma James P. Wright, de la Fundación Nacional estadounidense de la Ciencia, que, mirando a distancia suficiente, el panorama se uniformizaría; está claro que no es así."

Una de las pruebas fundamentales de la teoría según la cual el universo deriva de una gran explosión primigenia es la tenue radiación de microondas que alcanza la Tierra con intensidades virtualmente iguales desde cualquier dirección; se considera el residuo, casi imperceptible, de dicha explosión. Los teóricos mantienen que las semillas de las estructuras de gran escala, como el Supercúmulo Local, o, ahora, los complejos de Tully, debían encontrarse ya en los primeros estadios de la expansión del universo; en la radiación de microondas, dicen, deben advertirse las correspondientes irregularidades.

El intento probablemente más serio de conciliar la uniformidad de la radiación de microondas con la irregularidad de la distribución de las galaxias sugiere que los objetos visibles sólo representan parte de la materia que existe en el universo; al incluir en el cómputo la denominada materia oscura, afirman los defensores de esa teoría, la masa del universo se distribuye de modo uniforme. Según Wright "para algunos, la materia que emite luz sólo representaría la espuma de una jarra de cerveza negra". Son diversos los candidatos que portarían esa masa invisible (van a la cabeza los agujeros negros, neutrinos y cuerdas cósmicas), pero ninguna prueba obtenida por observación permite decantarse en favor de alguno de ellos. Al preguntarle sobre cómo se reconciliarían sus trabajos con la radiación uniforme de fondo, Tully respondió: "No me preocupa la cuestión. Sólo me interesa confirmar la existencia de esas estructuras".

La variedad 57

Dos estudios genéticos se han sumado a la batalla contra la diabetes. Uno ha profundizado en las causas de la diebetes insulinodependiente; el otro allana el terreno a una terapia que podría resultar de gran alcance en la curación de ese mal. La diabetes insulinodependiente, que, según parece, constituye un trastorno autoinmune, se produce al destruirse el 90 por ciento o más de las células beta pancreáticas elaboradoras de insulina. La escasez de insulina resultante provoca la elevación de los niveles de glucosa.

Hugh O. McDevitt, John A. Todd y John I. Bell, de la Facultad ed Medicina de la Universidad de Stanford, han descubierto que la sustitución de un aminoácido en ciertas proteínas determinadas por los genes del HLA (por *human leukocyte antigen*, antígeno leucocitario humano) incrementa notablemente el riesgo de desarrollar diabetes. Las proteínas HLA se encuentran en la superficie celular y colaboran en el desencadenamiento de la respuesta inmunológica.

Los genes HLA se encuentran agrupados en varias regiones. McDevitt y sus colegas se centraron en la HLA-D, puesto que, en esa región, alrededor del 95 por ciento de los diabéticos insulinodependientes portan el alelo DR3, el DR4 o ambos. (Alelos son las variantes de un mismo gen.) Se ha descubierto recientemente que los alelos HLA-DQ, que tienden a coincidir con variantes DR específicas, también se asocian fuertemente con la diabetes insulinodependiente y podrían incluso poseer un vínculo más estrecho con la afección. (Heredamos un alelo DR y otro DQ de cada progenitor; las cuatro proteínas resultantes constan de una cadena alfa y otra beta cada una.)

La presumible importancia de los genes DQ animó al equipo de Stanford a intentar la descripción de las secuencias de aminoácidos involucradas en la diabetes. Según informan en *Nature*, empezaron comparando los aminoácidos determinados por dos variantes DQ que se heredan a menudo junto con el gen DR4: DQ*w*3.2, muy común en los diabéticos, y DQ*w*3.1, que lo es menos. Comprobaron que sólo diferían en cuatro puntos, correspondientes a aminoácidos de la cadena beta.

Los análisis ulteriores dieron con el sitio relacionado con la diabetes. Se ha descubierto que, en la posición 57 de la cadena beta, el alelo DQ*w*3.2, y todas las variantes positivamente asociadas a la diabetes insulinodependiente, determina los aminoácidos valina, serina o alanina en vez de ácido aspártico. Por el contrario, todos los alelos DQ poco habituales entre los diabéticos determinan ácido aspártico en esa posición.

Los científicos advirtieron, además, que, en la totalidad de los 39 diabéticos seleccionados al azar, faltaba la secuencia correspondiente al ácido aspártico

2. "COMPLEJOS" GALACTICOS que pueblan la esfera de dos mil millones de años-luz de diámetro del plano desarrollado por ordenador por R. Brent Tully. La estructura horizontal es el Complejo de Supercúmulos Piscis-Ballena; los tres complejos de supercúmulos restantes (Acuario, Hércules-Corona Boreal y Leo) aparecen, respectivamente, arriba a la izquierda, arriba a la derecha, y abajo a la izquierda. Las cuñas vacías representan regiones oscurecidas por el polvo de la Vía Láctea

en la posición 57 de unos de sus alelos DQ, y que el 90 por ciento había heredado de sus dos progenitores alelos DQ Asp-57 negativos. Los autores concluyeron que la posesión de al menos un gen DQ que determine ácido aspártico en la posición 57 suele conferir resistencia frente a la diabetes insulinodependiente; la presencia de dos brinda una protección casi total, mientras que la carencia de Asp-57 en los alelos DQ de ambos progenitores provoca un incremento de la susceptibilidad.

¿Por qué la mera sustitución de un aminoácido de las proteínas HLA-DQ contribuye a que se padezca diabetes? Aun cuando lo probable es que ése no sea el único factor controlado genéticamente que propicia la enfermedad, las moléculas DQ Asp-57 seguramente adoptan una configuración tridimensional distinta de la de las restantes moléculas DQ. Esa diferencia podría influir en la virulencia del ataque autoinmunitario contra el páncreas.

En el frente terapéutico, Richard F. Selden y sus colaboradores, del Hospital General de Massachusetts, han logrado recientemente que el gen humano de la insulina actúe en el maíz. En primer lugar insertaron en un plásmido (un fragmento anular de ADN bacteriano) uno de esos genes y un marcador genético. Seguidamente añadieron el plásmido a un cultivo de fibroblastos (células de tejido conjuntivo) y clonaron las células que habían incorporado el gen de la insulina en su ADN y elaboraban la hormona.

Inyectaron los fibroblastos alterados genéticamente en el abdomen de 10 ratones diabéticos y al cabo de una semana comprobaron que los niveles de glucosa en sangre de cinco de los ejemplares empezaron a descender. Puesto que la insulina retira glucosa de la circulación, el descenso señalaba que, en efecto, los genes elaboraban insulina funcional. Los niveles persistieron en su bajada durante unas tres semanas, al cabo de las cuales, irónicamente, los ratones murieron por un exceso de insulina. No cabe duda de que la introducción en diabéticos humanos de células portadoras del gen de la insulina deberá ir precedida de trabajos exhaustivos, pero anima a ese empeño la elaboración de insulina por parte de los fibroblastos implantados.

Pantallas planas

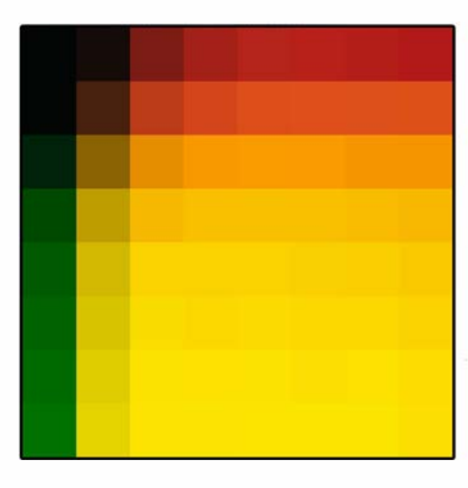
Llegan por fin las pantallas planas, sustitutos largamente anunciados de los voluminosos tubos de rayos catódicos de los televisores y las pantallas de ordenador. En el mercado hay ya diminutos receptores a color de pantalla plana y un fabricante japonés ha presentado recientemente unidades de 14 pulgadas de diagonal. William J. Caffery, de Gartner Group, Inc., empresa consultora de informática de Stamford, Connecticut, opina que los dispositivos de pantalla plana se encuentran "a punto de despegar". Como en otras muchas tecnologías de consumo, parece que los tiros vienen de Japón.

En una de las técnicas aplicadas, la de plasma, se genera una luz roja brillante por ionización de un gas. Algunos ordenadores portátiles disponen ya de pantallas de plasma monocromáticas y varios fabricantes japoneses han presentado unidades cromáticas, que, para producir luz visible de colores, generan luz ultravioleta que estimula una capa de fósforo. Las pantallas amarillas "electroluminiscentes" se sirven de materiales cristalinos que emiten luz cuando se excitan; también están en vías de desarrollo las versiones a color. El obstáculo principal que presentan las pantallas de plasma y las electroluminiscentes es su elevado consumo.

Los mayores avances en ese campo se están registrando por la mejora de las pantallas de cuarzo líquido (LCD, por *liquid-crystal displays*). En esos dispositivos, se confina entre dos capas de vidrio, a su vez dispuestas entre dos filtros de polarización cruzados, una delgada película de un compuesto orgánico cuyas moléculas, cilíndricas, tienden a alinearse en una misma dirección, en una configuración en cierto modo cristalina. La orientación dominante de las moléculas gira un ángulo de 90 grados de uno a otro lado de la capa de cristal líquido, de suerte que ésta rota la luz que admite uno de los filtros y le permite atravesar el otro.

Una de las hojas de vidrio que encierran el cristal líquido está atravesada por finos electrodos dispuestos verticalmente; la otra por electrodos horizontales. La aplicación de un potencial en un par cualquiera de electrodos horizontales y verticales activa el elemento de imagen, o píxel, de su intersección, lo que provoca la reorientación de las moléculas que lo forman y evita así la rotación de la luz polarizada. Los polarizadores cruzados bloquean entonces esa luz: el píxel parece haberse oscurecido. Por medio de los filtros pertinentes se añade color.

Los LCD más primitivos —las pantallas de negro sobre gris o gris sobre verde de los ordenadores de bolsillo o relojes digitales— presentan un ángulo de visión reducido; además, en las pantallas de gran tamaño, el contraste, escaso de por sí, se deteriora por la activación impertinente de píxeles. Se espera que mejore el contraste con un nuevo cristal líquido que provoca un "supergiro"de 270 grados.



3. DISPOSITIVO ELECTROLUMINISCENTE de película delgada desarrollado por Planar Systems, Inc., de Beaverton, Oregon. Emite luz de forma activa por medio de un material cristalino. La pantalla plana mide, en diagonal, alrededor de seis pulgadas y su grosor es de unos dos centímetros

Otro problema de las pantallas de gran tamaño: el parpadeo, causado por la imposibilidad de activar más de una hilera de píxeles a la vez y por la tendencia de las moléculas a recobrar la posición de reposo en cuanto dejan de recibir carga. En ese sentido, se investiga intensamente los cristales líquidos "ferroeléctricos", cuyas características dotan de memoria a las configuraciones de sus moléculas e impiden de ese modo el parpadeo. Esas moléculas también se ven afectadas en menor medida por las fugas de corriente, lo que mejora el contraste.

En los LCD de "matriz activa" se aborda el problema del contraste por medio de los dispositivos electrónicos que controlan la imagen. En las matrices activas típicas, un transistor de película delgada construido en la pantalla controla cada píxel, conmutándolo entre los estados activo e inactivo, a pesar de las fugas. Sin embargo, dado los bajos rendimientos de la fabricación actual, resulta arriesgado aventurarse en la producción de unidades de gran tamaño. Todos los transistores —y las pantallas de televisor de tamaño común portarían centenares de miles— deberían trabajar a la perfección. Los mayores paneles de matriz activa que han salido al mercado, por ejemplo, el de la televisión portátil de color fabricada por la Sharp Corporation, son de unas tres pulgadas y resultan muy caros.

Cuerdas cósmicas

¿Por qué se agrupan estrellas y galaxias y no se distribuyen uniformemente por el espacio? ¿Qué es lo que provoca su agregación? Finas cuerdas de energía, creadas durante el nacimiento del universo, podrían explicar esa atracción

Alexander Vilenkin

El universo no es uniforme. Las estrellas se agrupan en galaxias y éstas en cúmulos. Con el tiempo esa irregularidad se va agrandando a medida que la acción gravitatoria de los cúmulos de galaxias atrae otras galaxias de las regiones vecinas. Las teorías modernas de la formación de galaxias suponen que el universo era, en el pasado, mucho más uniforme que ahora, y que todas las galaxias y cúmulos surgieron a partir de mínimas irregularidades en una distribución de materia que, por otro lado, era casi uniforme. Las implicaciones de estas teorías han sido objeto de un estudio detenido, pero queda abierta todavía una cuestión fundamental: ¿en qué consistían esas irregularidades iniciales? ¿Cómo nacieron?

Entran en ese momento las cuerdas cósmicas, entidades exóticas e invisibles ideadas por las teorías de la física de partículas. Las cuerdas son hilos remanentes del tejido del universo recién nacido. De increíble densidad y energía, viajan a casi la velocidad de la luz y curvan el espacio que las rodea. Creadas en el segundo que siguió a la gran explosión, esa madeja enredada y de longitud infinita originó bucles, que se agitaron con violencia y fueron perdiendo su energía, de manera gradual, en sus propios giros.

Nadie sabe a ciencia cierta si existen tales cuerdas cósmicas. En caso afirmativo, justificarían, eso creen muchos físicos, la distribución arracimada de la materia en el universo. Bucles de cuerdas, dotados de gran masa, aportarían la atracción gravitatoria necesaria para aglutinar galaxias y cúmulos galácticos. Pero esos bucles se distinguen también por la brevedad de su vida media; aun cuando ocuparan alguna vez el universo, hoy habrían desaparecido en su mayor parte.

Cabe la posibilidad de que algunas cuerdas, de masa menor, persistieran, pero son difíciles de detectar. Aunque los astrónomos, equipados con medios más sensibles y la agudeza exigida por el caso, podrían rechazar o confirmar la existencia de las cuerdas cósmicas de aquí a unos años. Su búsqueda tiene a los físicos en vilo, pues el descubrimiento de una cuerda abriría nuevas perspectivas sobre la naturaleza elemental de la materia y el origen del universo. Antes conviene entender la noción de cuerda cósmica en el dominio de la física de partículas y en el ámbito de la cosmología.

Rotura de la simetría

Sabemos ya, con bastante seguridad, que el universo empezó, hace unos quince mil millones de años, en una gran explosión ("big bang"). El universo prosigue todavía su expansión bajo la fuerza de aquella eclosión inicial; las galaxias remotas se están alejando de la Tierra a velocidades altísimas. Combinando las observaciones astronómicas con las leyes comprobadas de la física de partículas, se reconstruye la historia del universo hasta fracciones de segundo inmediatamente posteriores a la gran explosión. No había ni estrellas, ni galaxias, ni átomos; el universo era entonces una bola de fuego, caliente y densa, de electrones, fotones y otras partículas elementales de semejante tenor.

Por debajo de las partículas, y determinando sus interacciones, se encuentra el vacío. Lejos de significar la "nada", el vacío constituye para el físico un estado de mínima energía, obtenido en ausencia de todas las partículas. La relación entre las partículas elementales y el vacío es parecida a la relación entre las ondas sonoras y la materia por donde se propagan: los tipos de onda y la velocidad de propagación difieren con los materiales. Como las propiedades del vacío no han sido siempre las mismas, han cambiado también las propiedades y las interacciones de las partículas elementales.

El vacío primitivo tenía una energía inmensa y un alto grado de simetría; es decir, no había distinción entre las interacciones de las partículas fundamentales. Las fuerzas electromagnéticas y las fuerzas nucleares débiles y fuertes se manifestaban como aspectos de una sola fuerza unificada. La energía actual del vacío es cero y las fuerzas elementales divergen hoy por su intensidad y carácter. Queda poco de la unidad original. ¿Cómo se rompió tal simetría?

Conforme el universo fue expandiéndose y enfriándose tras la gran explosión, el vacío atravesó una rápida sucesión de cambios o transiciones de fase. De éstas, las más conocidas son las que sufre el agua cuando se enfría de vapor a líquido y, luego, a hielo. Podemos describir también las transiciones de fase en función de la rotura de simetría, pues a menudo reducen los estados simétricos a estados asimétricos. En ese contexto, un cristal es menos simétrico que un líquido: el líquido "parece el mismo" en todas direcciones, mientras que las distintas direcciones de una red cristalina no son todas equivalentes.

Nadie sabe exactamente cuántas transiciones de fase se desarrollaron en el joven vacío, pero sí resulta verosímil que todas ellas acontecieran durante el primer segundo después de la gran explosión. E igual que ocurre en las transiciones de fase de los materiales comunes, las transiciones de fase cosmológicas pudieron dar lugar a defectos. En el interior de los defectos, la simetría no se rompe y queda atrapado el vacío primitivo, más simétrico. Las distintas teorías de partículas predicen clases diferentes de defectos. Algunas aventuran que los defectos tomarán la forma de superficies; otras predicen líneas o puntos. Estas clases de defectos se denominan, respectivamente, paredes de dominio, cuerdas y monopolos.

Las cuerdas cósmicas constituyen, pues, uno de los tres posibles tipos de fallos en la continuidad del vacío. ¿Por qué se les ha elegido en las teorías de

formación de galaxias? Aunque pudiera parecer poco seria, una primera razón de tal opción es porque se trata del defecto menos relevante. El vacío de alta energía atrapado dentro de los defectos es, debido a la relación de Einstein entre masa y energía, sumamente masivo. En consecuencia, los defectos pueden ejercer una profunda influencia en la evolución del universo. Una pared de dominio que se extendiera a través del universo actual poseería una masa mucho mayor que toda la masa de éste y provocaría que las galaxias se acumularan más de lo que lo hacen. Por otro lado, aunque cualquier monopolo podría eludir su detección, las teorías que predicen su existencia consideran que abundan muchísimo. Si los monopolos existieran, el universo estaría lleno de ellos y resultaría difícil ignorarlos. Pero no se han observado ni paredes de dominio ni monopolos.

Líneas y bucles

Aunque nadie ha visto tampoco una cuerda cósmica, los físicos no esperan que las cuerdas sean tan manifiestas. Hace 12 años que T. W. B. Kibble, del Colegio Imperial de Ciencia y Tecnología de Londres, iniciaba el estudio de las cuerdas cósmicas. Kibble abordó la formación de éstas en el universo primitivo; en un trabajo publicado en 1976 examinaba algunos aspectos de su evolución. Sin embargo, la noción de cuerda no atrajo la atención de los expertos hasta cuatro o cinco años más tarde, cuando Yakov B. Zel'dovich, del Instituto de Problemas Físicos de Moscú, y el autor de este artículo ad-



1. DEFECTOS PRODUCIDOS EN EL HIELO durante la congelación, cuando distintas regiones del agua cristalizan con orientaciones diferentes. De acuerdo con ciertas teorías de la física de partículas, un proceso análogo podría haber generado defectos lineales en el vacío del espacio, a medida que el universo se fue enfriando después de la gran explosión. Hasta ahora carecemos de datos que apoyen la existencia de cuerdas cósmicas, un tipo de defectos de esos.



2. CUMULO DE VIRGO, formado por miles de galaxias, algunas de las cuales aparecen aquí (*manchas blancas*). El autor sostiene en este artículo que ambos, cúmulos galácticos y galaxias, surgieron a partir de bucles masivos de cuerda cósmica que congregaron la materia del espacio en determinadas áreas.

virtieron, cada uno por su lado, que esos objetos podían explicar la "agrupación" de la materia en el universo. La semilla no cayó en terreno baldío y un pequeño grupo de investigadores decidió explorar las teorías de cuerdas con más detalle.

Esas entidades presentaban unas propiedades físicas fascinantes y únicas. La teoría de cuerdas cósmicas no tardó en despertar la misma atracción para los físicos que la que éstas ejercerían sobre estrellas y galaxias. En los dos últimos años ha aparecido una avalancha de trabajos sobre ese campo, pero no se ha encontrado todavía ninguna prueba experimental directa de su existencia. A pesar de la ausencia de datos empíricos, los físicos han establecido un cuadro impresionante de propiedades de las cuerdas. Algunas propiedades se admiten en el marco de la teoría de partículas utilizada para inferirlas; otras son comunes a todas las teorías.

Las cuerdas cósmicas son tubos delgados de vacío simétrico y de alta energía. Carecen de extremos: forman bucles cerrados o se extienden hasta el infinito. El carácter físico de una cuerda viene determinado por la energía del vacío atrapado en su interior. Las cuerdas con el vacío más simétrico, en el que las fuerzas fuertes, débiles y electromagnéticas se unifican, son las más delgadas y las más masivas. Se trata también de las más notables y encierran el máximo interés cosmológico por cuanto podrían ser las responsables de la formación de galaxias.

Dichas cuerdas poseen unos 10^{-30} centímetros de espesor y una masa ingente: una pulgada de cuerda pesaría 10.000 billones de toneladas. La tensión, que corre en ellas paralela a su masa, provoca que los bucles cerrados de cuerda oscilen con brusquedad, a velocidades cercanas a la de la luz. Por ejemplo, un bucle de un año-luz de longitud completaría una oscilación en algo más de un año. (El año-luz, una unidad de longitud, es la distancia que la luz recorre en un año: unos ocho billones de kilómetros.)

Producción de ondas

Las cuerdas producidas durante una transición de fase tejen una enmarañada red que inunda el universo. La evolución de este tejido cósmico ha conocido múltiples procesos físicos. Aunque en promedio la red es uniforme, sus cuerdas componentes resultan irregulares e intrincadas. Agitadas frenéticamente por la tensión, las cuerdas curvas se entrecruzan consigo mismas y unas con otras; se rompen en el punto de intersección, para unirse de nuevo en configuraciones distintas. Bucles cerrados se desdoblan al retorcerse sobre sí mismos. Las cuerdas largas y trenzadas se entrecruzan consigo mismas y los bucles cerrados forman nuevos lazos en las intersecciones.

Se tarda más en formar bucles grandes que en construir los pequeños, por la sencilla razón de que una cuerda debe doblarse sobre sí misma para cerrar el bucle y retroceder más para generar un bucle mayor. El tamaño del bucle que puede desprenderse en un momento dado está limitado por la cantidad de tiempo que ha transcurrido desde la gran explosión. En concreto, dado que las cuerdas se mueven a velocidad cercana a la de la luz, el bucle no puede ser mayor que la distancia que la luz ha recorrido desde el inicio del universo ("distancia del horizonte"). Por tanto, los bucles pequeños de cuerdas cósmicas son característicos de un universo más joven; los que se crean actualmente son mucho mayores.

Esto no quiere decir que la red actual de cuerdas cósmicas difiera mucho de la que se estableció en un comienzo. La evolución de las cuerdas se caracteriza por la autosimilitud, que mantiene la constancia estadística de la red a lo largo del tiempo. Si la red de cuerdas se fotografiara en dos instantes distintos, la diferencia principal entre ambas imágenes residiría en la escala global, que viene fijada por la longitud del horizonte. Ampliando la primera fotografía por la razón de dos longitudes de horizonte, se obtendría una imagen bastante similar a la segunda.

La red está produciendo continuamente cantidades importantes de bucles cerrados; si se les dejara acumular, el universo nadaría en ellos. ¿Qué sucede, pues, con los bucles? El análisis teórico indica que, al oscilar, los bucles generan pulsos rítmicos de energía gravitatoria que se propagan a la velocidad de la luz. Esos pulsos, u ondas gravitatorias, agotan la energía de un bucle hasta que éste se contrae y acaba por desvanecerse. La vida media de una cuerda típica, con independencia de su tamaño, es de unas 10.000 oscilaciones. Como el período de una oscilación es mayor para los bucles grandes, éstos viven más que los pequeños. Igualmente, los bucles de cuerdas más ligeras, de baja energía, duran más que los bucles pesados y energéticos, que agrupan la materia en galaxias y cúmulos.

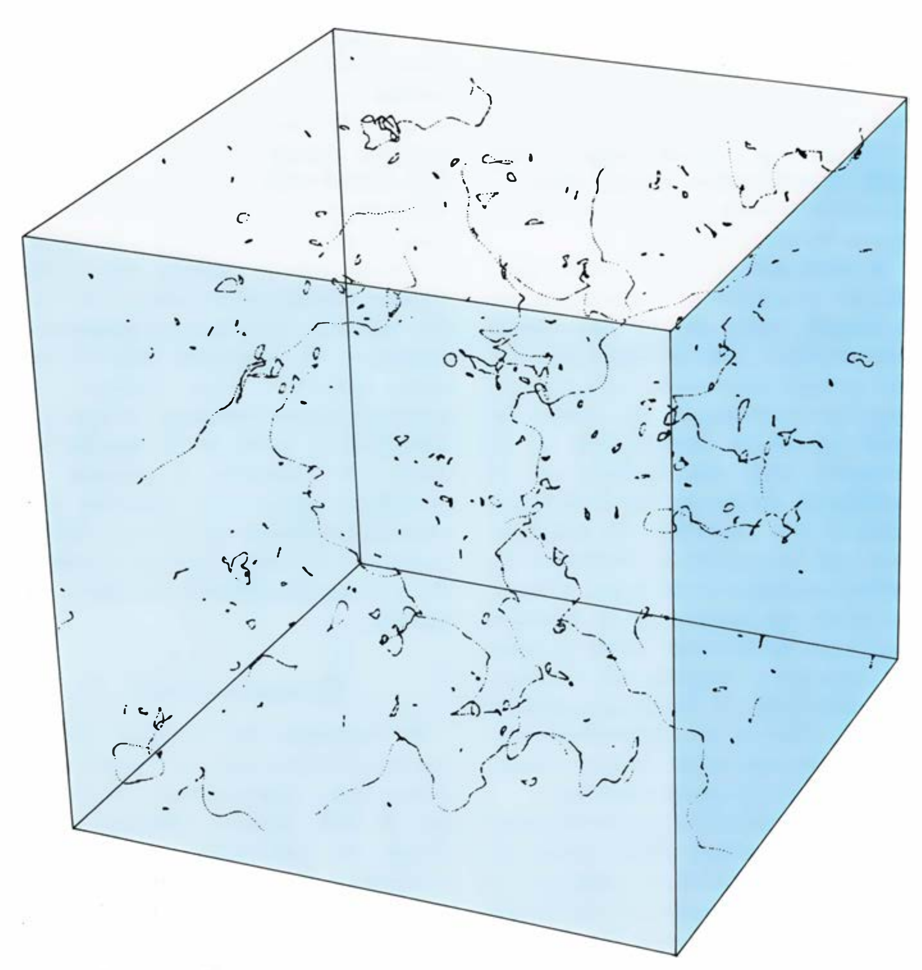
El menor bucle de cuerda pesada que puede haber sobrevivido hasta hoy tiene un diámetro aproximado de un millón de años-luz, y es bastante mayor que cualquier galaxia conocida. Por contra, los bucles que dieron lugar a las galaxias poseían un tamaño estimado de unos 100 años-luz; aunque se desintegraron cuando el universo contaba sólo con un millón de años, vivieron lo suficiente para atraer la materia circundante y formar grumos que, más tarde, se convertirían en galaxias. Los bucles mayores atraían a la materia y a los bucles menores, con su correspondiente materia; y así, originaron luego los cúmulos galácticos. Este escenario de acontecimientos constituye la clave de bóveda de la teoría de las cuerdas relativa a la formación de galaxias. El modelo se apoya en la atracción gravitatoria localizada, ejercida por bucles cerrados y de masa ingente, constituidos por cuerdas cósmicas en rápida oscilación.

El espacio cónico

El desarrollo del escenario de las cuerdas cósmicas empezó a adquirir seriedad sólo recientemente. A principios de 1985, Andreas Albrecht y Neil Turok, del Laboratorio Nacional del Acelerador Fermi, diseñaron un programa de ordenador para simular la evolución de las cuerdas cósmicas. A finales de ese mismo año, Turok se sirvió de la simulación para calcular el número y distribución de cúmulos de galaxias predichos por la teoría de cuerdas. Sus resultados concuerdan con la observación real: los cúmulos no se disponen al azar en el firmamento, sino que tienden a formar supercúmulos. Esta agrupación se describe matemáticamente mediante una función de correlación. Pues bien, existe una semejanza sorprendente entre las funciones de correlación deducidas de las observaciones astronómicas y las deducidas de las simulaciones de ordenador de Turok.

No obstante su éxito inicial, la teoría de cuerdas está muy lejos de constituir una explicación completamente satisfactoria de la formación de galaxias. Las observaciones recientes de la distribución galáctica a gran escala hablan de configuraciones filamentosas y laminares, así como de enormes vacíos carentes, casi por entero, de galaxias. Los cosmólogos tienen ante sí el reto de dilucidar si el modelo de cuerdas puede o no dar cuenta de esas estructuras. Y aun cuando pudiera, los físicos nunca creerán realmente en las cuerdas hasta que la observación directa confirme su existencia.

De las cuerdas pesadas, altamente simétricas, la más próxima a la Tierra debería estar a unos 300 millones de años-



3. MODELACION DE UNA RED DE CUERDAS en un computador; simula su formación y evolución. La red incluye bucles cerrados y cabos largos de cuerda que se estira por el universo y crea más bucles.

luz; las ligeras podrían hallarse más cerca, pero su presencia resulta quizá menos evidente. ¿Cómo puede alguien esperar, pues, que se detecten esos objetos esquivos a tamañas distancias? Por fortuna para nosotros, las extrañas propiedades gravitatorias de las cuerdas cósmicas posibilitan la detección. A fin de ilustrar cómo, debe describirse primero el carácter gravitatorio de una cuerda ideal y estacionaria, puesta en línea recta.

Según la teoría de la relatividad general de Einstein, la gravitación es sinónimo de curvatura del espacio y el tiempo; en mi examen de las cuerdas cósmicas necesito considerar sólo la curvatura del espacio. Las cuerdas distorsionan el espacio de una manera muy peculiar. En la geometría euclídea, la razón de la longitud de una circunferencia a su diámetro es igual al número pi (3,14159). Para una circunferencia trazada alrededor de una cuerda cósmica esta razón es un poco menor (la diferencia sólo aparece en la cuarta cifra decimal). El espacio que rodea a una cuerda posee una naturaleza cónica. Para representárnoslo, imaginemos que cortamos una pequeña cuña del espacio euclídeo con el vértice en la cuerda; pegamos entonces las superficies que hayan quedado a la vista, no estirándolas, sino curvando el espacio a su alrededor. El resultado será que todos los planos perpendiculares a la cuerda se habrán convertido en conos.

El ángulo de la cuña así eliminada se llama ángulo de déficit, y en las cuerdas corresponde a unos segundos de arco. Todos los objetos que pasen cerca de la cuerda —fotones, átomos, estrellas— desviarán su dirección de movimiento original en un ángulo comparable al ángulo de déficit. Dos objetos que se muevan según trayectorias paralelas, simétricas a ambos lados de la cuerda, colisionarán después de sobrepasar la cuerda. Una persona que estuviera en uno de estos dos objetos, comenzaría por ver al otro en reposo; cuando la cuerda pasara por delante suyo, empezaría a moverse de repente hacia el desdichado observador, a una velocidad igual a 0,00002 veces la velocidad de la cuerda. Como las cuerdas corren a casi la velocidad de la luz, inducen velocidades de unos seis kilómetros por segundo.

¿Qué sucedería si una cuerda pasara a través de una persona? No es difícil imaginarlo. Cuando la cuerda cortara la cintura del individuo, su cabeza y sus pies empezarían a aproximarse a una velocidad de seis kilómetros por segundo. No sería, desde luego, ninguna experiencia agradable, pero no hay razón para asustarse: la probabilidad de que una cuerda atraviese el sistema solar es mínima.

La representación en espacio cónico de las propiedades gravitatorias de las cuerdas cósmicas sólo se aplica a las cuerdas rectas. Los efectos gravitatorios de las cuerdas curvas y de los bucles cerrados revisten mayor complejidad. Pero podemos considerar casi rectos los pequeños segmentos de tales cuerdas y, combinando los análisis de muchos segmentos de esos, se puede demostrar que, a grandes distancias de un bucle cerrado oscilante, el efecto promedio de todos los segmentos constituye una atracción gravitatoria ordinaria como la asociada a la Tierra o al Sol.

División de la luz

Las distorsiones que las cuerdas cósmicas inducen en el espacio podrían delatarnos su presencia. Y así, por curvar el espacio, las cuerdas pueden actuar cual lentes gravitacionales, lo que significa que desviarán la luz de una galaxia lejana de suerte tal que llegue a la Tierra por dos caminos distintos. En consecuencia, los observadores de la Tierra verán dos imágenes de la misma galaxia, separadas por un ángulo comparable al ángulo de déficit de la cuerda. De hecho, los astrónomos han encontrado varios pares de galaxias y de objetos distantes que brillan extraordinariamente, los cuásares, cuyos componentes muestran un gran parecido y se consideran, por tanto, imágenes dobles del mismo objeto.

Las galaxias o los cúmulos de galaxias pueden actuar también como lentes gravitatorias; ello obliga a someter las imágenes múltiples a una nueva prueba, que permita confirmar la causa. Nick Kaiser, de la Universidad de Cambridge, y Albert Stebbins, del Fermilab, han señalado que las cuerdas cósmicas deben provocar un efecto bastante insólito sobre la radiación de microondas cósmica. Esta radiación constituye una suerte de resplandor crepuscular de la gran explosión; llena todo el universo y llega, desde todas las direcciones, con la misma intensidad. Ahora bien, en la estela de una cuerda parte de la radiación ganaría un momento adicional en la dirección de la Tierra y, por tanto, se aproximaría al planeta con mayor intensidad. Así, mientras

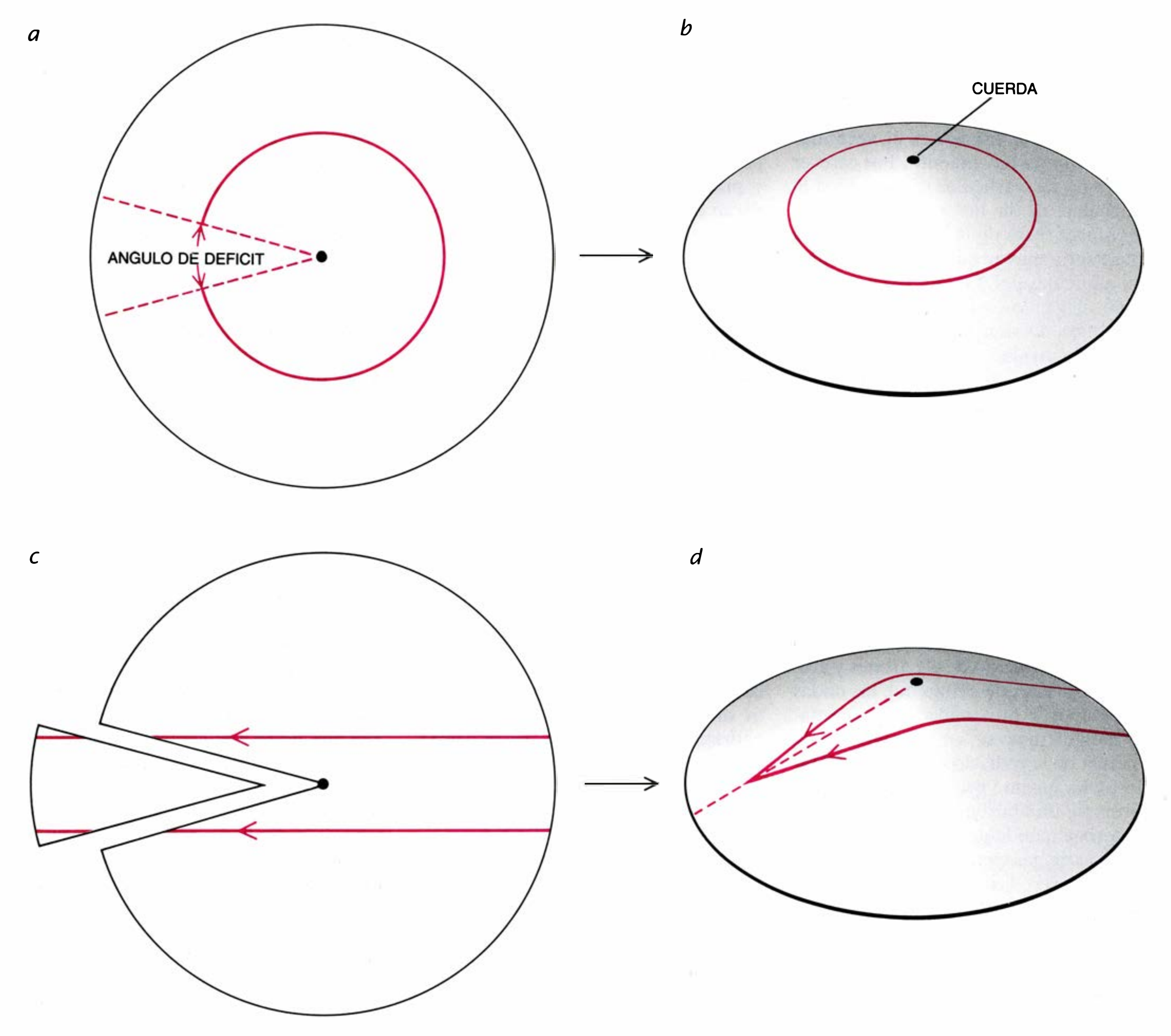
otros objetos gravitatorios pueden provocar cambios suaves en la intensidad de las microondas, el producido por una cuerda cósmica sería bastante brusco. Este cambio de intensidad repentino se produciría a lo largo de una línea trazada entre las dos imágenes que representan la misma galaxia. La magnitud del cambio puede ser de sólo una parte en 100.000, pero su detección, aunque difícil, no resultaría imposible.

Algún día, además, la búsqueda de las ondas gravitacionales de las cuerdas cósmicas podría facilitarnos la detección de estas últimas. Las ondas provinientes de bucles de todos los tamaños y formas se suman a un ruido de fondo gravitacional, que viene a ser el canto de cisne de las cuerdas muertas y moribundas. La intensidad de este ruido es alta, en comparación con la de las ondas gravitacionales que surgen de otras fuentes. Sin embargo, la gravedad es la más débil de todas las fuerzas de la naturaleza y el nivel de ruido predicho que llega de las cuerdas se halla aún ligeramente por debajo de los actuales límites observacionales.

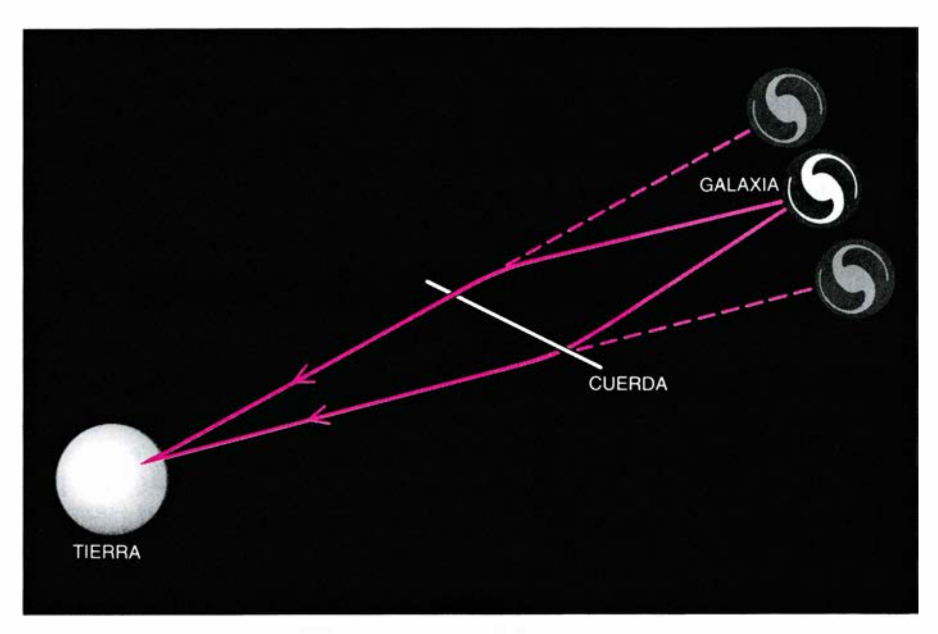
Superconductores cósmicos

Hasta hace poco, los físicos suponían que las cuerdas cósmicas sólo podían interaccionar con la materia a través de las fuerzas de gravitación. Pero hace tres años, Edward Witten, de la Universidad de Princeton, propuso que las cuerdas cósmicas podían estar dotadas de una propiedad muy buscada aquí en la Tierra: la superconductividad. Witten demostró cómo algunas teorías de las partículas elementales sugerían que las cuerdas poseían cualidades electromagnéticas inhabituales, de la clase que las haría comportarse como alambres superconductores. Más tarde, se puso también de manifiesto que esta propiedad podría producir efectos cosmológicos espectaculares.

Las cuerdas podrían ser superconductoras debido a que el vacío simétrico atrapado en su interior modifica el comportamiento de las partículas. En ese orden, algunas partículas cargadas (piénsese en los electrones) podrían carecer de masa en el interior de una cuerda cósmica. Por tanto, es posible, con muy poca energía, crear pares partícula-antipartícula, en los que los miembros presenten carga opuesta y se mueven en sentido contrario. La carga total y el momento total del par son iguales a cero; el único suministro de



4. CONOS DE ESPACIO creados alrededor de las cuerdas cósmicas pesadas y sus peculiares efectos gravitacionales; esta figura representa la distorsión del espacio por una cuerda recta ideal. La distorsión puede dibujarse cortando una cuña de espacio perpendicular a la cuerda (*a*) y juntando los dos bordes del plano formando un cono (*b*). Si dos objetos que viajan según trayectorias paralelas pasan a cada lado de una cuerda (*c*), se desviarán y colisionarán tras su paso (*d*).



5. IMAGEN DOBLE de única galaxia. Constituye el resultado de la distorsión gravitatoria de una cuerda interpuesta. La cuerda, que desvía la luz de una fuente, confiere al observador terrestre la impresión de dos fuentes. Si dos galaxias ofrecen una insólita semejanza, los físicos pueden buscar pruebas de una cuerda o de otra lente gravitacional entre la pareja. Las cuerdas se distinguen de tales lentes gracias al cambio brusco que ocasionan en la radiación de fondo de microondas; pero no se ha encontrado hasta ahora ninguna.

energía que se precisa es el necesario para iniciar el movimiento. Por carecer de masa, las partículas se mueven a la velocidad de la luz y no se pueden aventurar fuera de la cuerda, donde su masa sería mayor que cero. Por tanto, las partículas pululan por el vacío atrapado, llevando corriente eléctrica y sin encontrar resistencia: el sello de la superconductividad.

Jeremiah P. Ostriker, de Princeton, y su discípulo Christopher Thompson colaboraron con Witten en la elaboración de un modelo de cuerdas alternativo para la formación de las galaxias. En una cuerda superconductora la corriente produce campos eléctricos y magnéticos que se propagarían por el espacio vacío, alejándose de la cuerda en forma de ondas electromagnéticas. Pero el espacio interestelar e intergaláctico no está enteramente vacío: lo llena un gas diluido de electrones y átomos cargados que evitan que las ondas abandonen la proximidad de la cuerda. A medida que se va acumulando la energía de la radiación, va desarrollándose una ingente presión y comienza a formarse una burbuja, congregando la materia circundante en una capa en expansión de gas caliente. La burbuja en expansión no difiere mucho de una explosión gigantesca. En ese marco las galaxias se forman cuando colisionan las burbujas.

La teoría explosiva se contrapone, en cierto sentido, al modelo de acumulación gravitacional: la materia se aleja de la cuerda, en vez de ser atraída hacia ella. La teoría da también una explicación más natural de los vacíos separadores de la distribución de galaxias y predice que las galaxias se acomodarán en distribuciones laminares muy finas, una imagen bastante similar a la que observan los astrónomos. ¿Qué otras pruebas empíricas pueden utilizarse para comprobar el escenario explosivo?

Ostriker y sus colaboradores tienen que postular que el universo se magnetizó poco después de la gran explosión, pues era necesario contar con un campo magnético para crear los pares partícula-antipartícula. Nadie sabe con certeza cómo pudo originarse semejante magnetización; pero si existió, la magnetización residual debería persistir actualmente en el espacio intergaláctico. La teoría puede comprobarse, por tanto, buscando indicios de una magnetización débil y deslocalizada en el universo. Además, el gas caliente de las paredes de las burbujas puede emitir ondas de radio características que podrían detectarse aquí, en la Tierra, mediante radiotelescopios.

¿Por el hilo al ovillo?

Aparte de su papel en las teorías de la formación de galaxias, la noción de cuerdas cósmicas superconductoras evoca otra manera de detectar las cuerdas. Aun cuando no hubiera habido campos magnéticos en el universo primitivo, se habrían generado en virtud de la energía rotacional de las galaxias, a través del efecto dinamo galáctico. Actualmente, la intensidad del campo magnético que hay en una galaxia normal es sólo una millonésima del campo magnético terrestre. La corriente que tal campo induciría en un bucle de cuerda superconductora resulta demasiado débil para provocar una burbuja explosiva de radiación; sin embargo, los cálculos que el autor ha realizado con Eugene M. Chudnovsky, de la Universidad Tufts, George B. Field, del Centro Astrofísico Smithsoniano de Harvard, y David N. Spergel, del Instituto de Estudios Avanzados, demuestran que la interacción entre esta corriente y las partículas cargadas del espacio interestelar puede generar ondas de radio.

En diciembre de 1985, Mark Morris, de la Universidad de California en Los Angeles, y Farhad Yusef–Zadeh, del Centro Goddard de Vuelos Espaciales de la NASA, descubrieron, en el centro de la Vía Láctea, varias fuentes de radio en forma de cuerda a las que llamaron hilos ("threads"). Estos hilos podrían ser cuerdas cósmicas ligeras, de baja energía. De ocurrir tal, podrían observarse en movimiento. La velocidad con la que tales cuerdas se mueven se traduciría, en el cielo, en unos segundos de arco por año. Ciertas mediciones provisionales han establecido ya un límite superior de velocidad de 1,5 segundos de arco por año. Aunque esta cifra es menor de la esperada, no elimina definitivamente la posibilidad de los hilos galácticos, ya que buena parte de su movimiento podría ser en la dirección de la línea de observación, y no perpendicular a ella. El movimiento según la línea de observación no podría detectarse.

A pesar del carácter prematuro de las pruebas empíricas de la teoría de las cuerdas cósmicas, los físicos se sienten proclives a utilizar las propiedades, potentes e insólitas, de las hipotéticas cuerdas para explicar todo tipo de fenómenos misteriosos. Se les ha atribuido ya una posible función de fuentes de rayos cósmicos (corrientes de partículas energéticas que llenan el espacio y que aún no se han explicado). Podrían ser también el origen de intensos destellos de rayos gamma que se observan regularmente, de los que apenas sabemos nada. Se llega incluso a sospechar que las cuerdas generan la energía de los cuásares. Las razones aducidas para apoyar tales atribuciones no resultan muy convincentes; quizá sean erróneas en su mayoría. Lo que no impide que los físicos teóricos se sientan entusiasmados con la potencialidad de las cuerdas cósmicas. La naturaleza se encargará de dar su inapelable veredicto final sobre el trabajo realizado.

Computación conjunta en circuitos neuromorfos

Los circuitos electrónicos que se basan en modelos neurobiológicos resuelven con rapidez tareas complejas. Sus propiedades son fruto de la interacción de numerosos elementos, entrelazados en una red

David W. Tank y John J. Hopfield

Los ordenadores digitales modernos son novicios en el mundo de la computación. Desde hace millones de años existen ordenadores biológicos, como el cerebro y el sistema nervioso de humanos y animales, que exhiben una maravillosa eficacia en el procesamiento de la información sensorial y en el control de las interacciones de los animales con su entorno. Echar mano a un bocadillo, reconocer un rostro o recordar cosas relacionadas con el sabor de las magdalenas son tareas computacionales, lo mismo que lo son la multiplicación o el desarrollo de un vídeojuego.

La gran eficacia de la computación biológica induce a pensar en la posibilidad de lograr capacidades similares en dispositivos artificiales basados en los mismos principios de diseño que los sistemas neuronales. Los autores han estudiado varios circuitos electrónicos, inspirados en el principio de la "red neuronal", que realizan cómputos importantes. Aunque esos modelos sencillos presentan un parecido meramente metafórico con los ordenadores biológicos naturales, ofrecen un punto de vista distinto y elegante desde el cual considerar la computación mecánica, que está sirviendo de inspiración a nuevos diseños de microcircuitos y ordenadores. Tal vez proporcionen también vías nuevas para comprender los sistemas biológicos.

Las investigaciones en curso sobre esa materia se asientan sobre una larga historia de esfuerzos y tentativas por capturar y plasmar en modelos matemáticos los principios de la computación biológica. Ese interés comenzó con las investigaciones de las neuronas, en tanto que dispositivos lógicos, emprendidas en 1943 por Warren S. MacCulloch y Walter H. Pitts, auténticos pioneros en este campo. Durante el decenio de 1960, Frank Rosenblatt, de la Universidad de Cornell, y Bernard Widrow, actualmente en la Universidad de Stanford, crearon "neuronas adaptables" y redes sencillas capaces de "aprender". La Adaline (por *adaptive linear element*, elemento lineal adaptable) de Widrow es un sistema mononeuronal capacitado para aprender a reconocer un patrón (una letra, por ejemplo) con independencia de su orientación o tamaño. A lo largo de las décadas de 1960 y 1970, un reducido número de investigadores, de los que citaremos a Shunichi Amari, Leon N. Cooper, Kunihiko Fukushima y Stephen Grossberg, trataron de modelizar el comportamiento de las neuronas reales en las redes computacionales y abordaron el desarrollo de las nociones matemáticas y arquitectónicas requeridas para extraer los elementos característicos de los patrones, clasificar pautas y obtener sistemas de "memoria asociativa"; en éstos, determinados fragmentos de la propia información almacenada sirven para recobrar la totalidad de un recuerdo.

La década de 1980 ha sido testigo de un extraordinario aumento del interés por los modelos neuronales y por sus propiedades computacionales. Tal fenómeno ha sido fruto de la convergencia de muchos factores: los neurobiólogos conocen mejor los mecanismos de procesamiento de la información en la naturaleza; el abaratamiento de los recursos informáticos ha permitido analizar con detalle los modelos, y existe un creciente interés por la computación en paralelo y por los dispositivos analógicos de integración a muy gran escala (VLSI), que han posibilitado la experimentación con circuitos neuromorfos. Tales progresos han venido acompañados de nociones matemáticas nuevas acerca de los modelos neuronales. Nuestro trabajo se ha centrado en los principios que provocan la aparición de un comportamiento computacional en un tipo particular de circuito neuromorfo.

Las neuronas, o células nerviosas, son complejas. Por ello, hasta el modelo más sencillo de neurona, cuando se conecta con otros en una red bien establecida, realiza tareas computacionales no triviales. Las neuronas genuinas reciben información de otras a través de conexiones sinápticas y, a su vez, transmiten señales a otras, incluso a un millar de ellas. La sinapsis, el punto de conexión entre neuronas, gradúa la "intensidad" con que la señal pasa de una neurona a otra. No es difícil construir circuitos "neuronales" artificiales. Basta sustituir las neuronas por amplificadores operacionales y remedar las sinapsis con cables, resistencias y condensadores. La tensión de salida del amplificador representa la actividad del modelo de neurona; las corrientes que atraviesan los cables y resistencias, el flujo de información en el seno de la red.

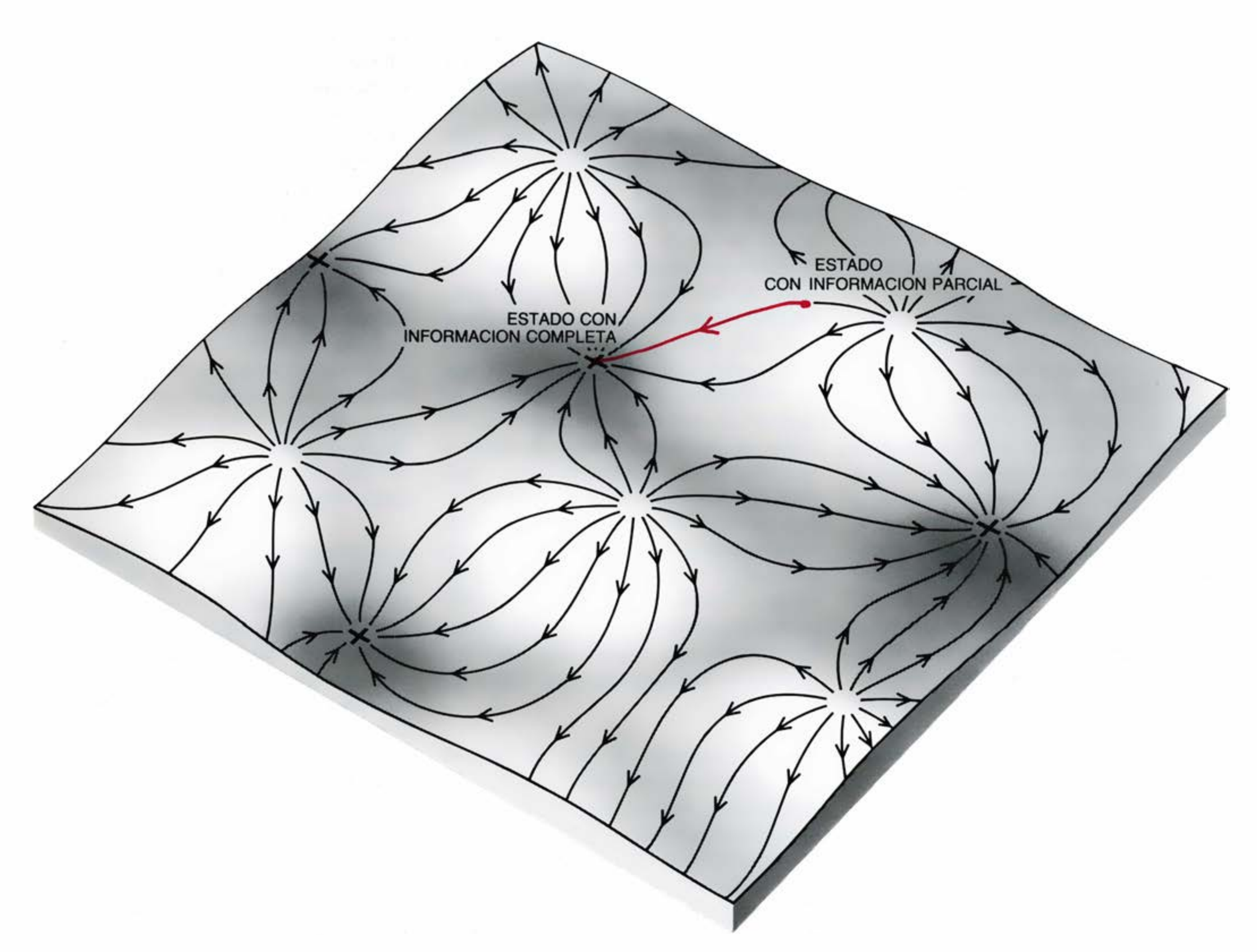
Resulta sorprendente que el modelo simplificado de la neurona natural comparta con la red artificial una misma formulación matemática de sistema dinámico; así se llama el sistema compuesto por varias partes en mutua interacción, cuyo estado evoluciona continuamente en el tiempo. La evolución particular que sigue un sistema dinámico depende de la forma de las interacciones. En toda red nerviosa, tales interaceiones provienen de los efectos que unas neuronas ejercen sobre otras en virtud de las conexiones que las ligan. Nada tiene de especial, pues, que el comportamiento de los circuitos neuronales dependa de modo decisivo de la naturaleza de las conexiones. Los

circuitos que hemos estudiado presentan esquemas de conexión adecuados para el cómputo de soluciones de problemas de optimización, una clase de tareas matemáticas que comporta la determinación de una solución "óptima" entre un gran número de soluciones posibles.

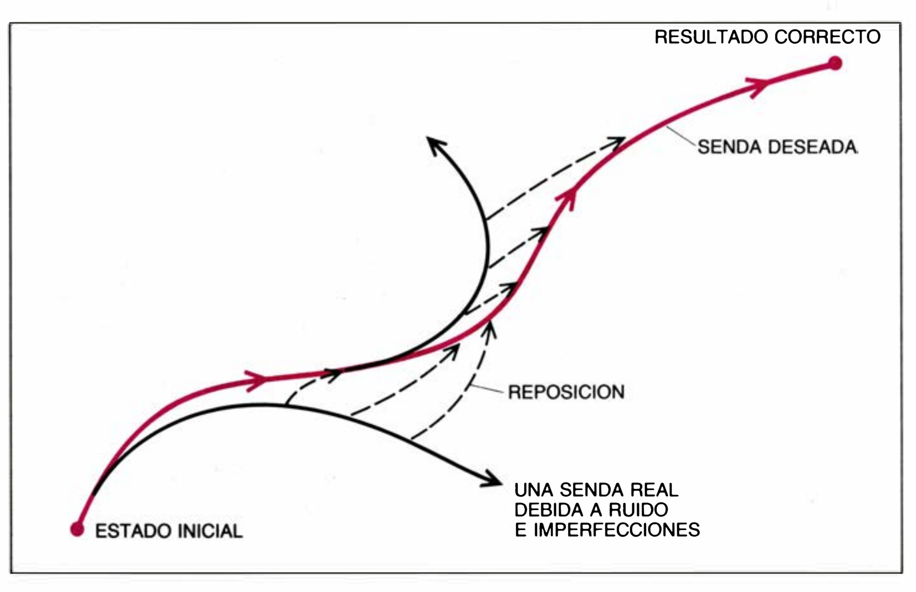
El comportamiento computacional que manifiestan tales circuitos constituye una propiedad conjunta, resultante de hacer que muchos elementos de cómputo actúen unos sobre otros en un sistema intensamente interconectado. Las propiedades conjuntas pueden estudiarse mediante modelos simplificados de neuronas, a imagen de lo que ocurre con otros macrosistemas físicos, que se abordan reduciendo drásticamente los pormenores de sus componentes básicos. Así, para estudiar el origen de las leyes generales de la dinámica de fluidos, podemos simplificar la descripción de las complejas colisiones moleculares y producir un modelo domeñable que recoja las características generales (temperatura y viscosidad, por ejemplo). Análogamente, en nuestra pretensión de desarrollar un modelo manejable de los cómputos realizados por un número ingente de neuronas modelo, descargamos el acento de los detalles de procesamiento que acontecen en el nivel de las células o sinapsis singulares. Merced a tal simplificación, hemos descubierto los principios generales que permiten comprender la computación conjunta de esos circuitos.

Para interpretar la actuación de los circuitos mancomunados, resulta conveniente acercarse con visión muy amplia a la esencia de la computación. Toda entidad computadora, se trate de un dispositivo digital o analógico o de un grupo de células nerviosas, parte de un estado inicial y va experimentando una serie de cambios hasta llegar a un estado que corresponda a una "solución". Ese proceso viene a ser como un camino o senda que enlaza el estado inicial con el final a través del "espacio de configuraciones" físicas del ordenador al evolucionar éste en el transcurso del tiempo. En un ordenador digital, por ejemplo, el espacio de configuraciones está definido por el conjunto de tensiones de los dispositivos componentes. Los datos que le son facilitados, más el programa, proporcionan los valores iniciales de tal conjunto, que va cambiando conforme avanza el cómputo y alcanza una configuración final, de la que se informa a un dispositivo de salida: la pantalla de un monitor o una impresora.

Toda entidad computadora plantea dos cuestiones de importancia crítica. Primera, ¿cómo determina la senda completa? y, segunda: si por culpa de las fluctuaciones físicas y el "ruido" el ordenador pierde el rumbo y queda a la deriva sin esperanza, ¿cómo retornará a dicha senda? En el caso de los



1. ENERGIA COMPUTACIONAL de un circuito de decisión conjunta, que puede representarse a modo de un paisaje de colinas y valles. La red de interconexiones y otras características físicas del circuito determinan sus perfiles. El circuito computa siguiendo una senda, que hace decrecer la energía de cálculo hasta que alcanza lo más hondo de un valle, igual que una gota de agua se desliza pendiente abajo hasta hacer mínima su energía potencial de gravitación. La superficie podría representar una memoria asociativa: los valles corresponderían a recuerdos, almacenados como sistemas de informaciones asociadas (*las X*). Si se inicia el circuito a partir de una información incompleta, se seguirá una senda hasta el valle más cercano, que contiene la información completa.



2. SENDA COMPUTACIONAL que describe la evolución del estado físico de un ordenador mientras opera. En un ordenador digital, la senda consta de una secuencia de pasos controlados por las líneas de código de un programa. Tras cada paso, el cómputo se devuelve a la senda deseada. En los circuitos de decisión conjunta, la senda se canaliza continuamente según determine la red de interconexiones del circuito.

ordenadores digitales, el camino se desglosa en pasos lógicos, que constituyen el programa. Además, cada unidad de cómputo se protege de las fluctuaciones de tensión mediante el tratamiento de un intervalo de tensiones −y no de uno solo y exacto−, que sería igual al valor nominal; por ejemplo, todas las señales comprendidas entre 0,8 y 1,2 volt se restablecerían en el valor de 1 volt, tras cada paso lógico de la computación.

El proceso computacional es notablemente distinto en el caso de los circuitos de decisión conjunta. La progresión global del cómputo no queda determinada por instrucciones detalladas paso a paso, sino por la rica estructura de conexiones que unen los dispositivos computadores. En lugar de avanzar y después restaurar la senda computacional a intervalos fijos, el circuito la canaliza o enfoca en un proceso continuo. Uno y otro estilo de computación se asemejan bastante a dos técnicas diferentes de adopción de acuerdos en comités. En un comité del tipo "ordenador digital", los miembros emiten, en sucesión, un voto afirmativo o negativo; conocen sólo algunos de los votos precedentes y no pueden cambiar el suyo tras emitirlo. En un comité de decisión conjunta, por el contrario, todos los miembros votan simultáneamente y pueden expresar un abanico entero de opiniones; los miembros tienen información completa acerca de los votos de los demás y pueden modificar su opinión. El comité genera una decisión conjunta, que bien podríamos llamar el sentir de los agregados.

La naturaleza de la computación conjunta sugiere que podría revestir especial eficacia en los problemas que comportan una interacción global entre diversas partes del problema. Los autores han diseñado circuitos que realizan ese tipo de computación al resolver ciertos problemas de optimización. Ejemplo típico es el problema de asignación de tareas, como el que plantea la siguiente cuestión: si se dispone de cierto número de ayudantes y de cierto número de tareas, y cada ayudante realiza cada tarea a un ritmo diferente, ¿cómo repartir las tareas de modo que el rendimiento total sea máximo? El circuito de red neuronal capaz de resolver el problema consta de muchos amplificadores interconectados, que procesan los datos en paralelo. Es capaz de recorrer velozmente la senda computacional y llegar con prontitud a una solución. Dado que se trata de un circuito bastante complejo, conviene empezar por examinar algunos circuitos sencillos que arrojen luz sobre los principios fundamentales de todos los de ese tipo.

El más sencillo de los circuitos al efecto es el biestable ("flip-flop" o basculante), de uso generalizado en la industria electrónica. El circuito tiene dos estados estables (de ahí su nombre) y toma una decisión, optando por uno de los estados. Puede construirse con un par de amplificadores saturables [*véase la figura 3*]. En un amplificador tal, la tensión de salida va aumentando al tiempo que lo hace la de entrada, hasta que alcanza un nivel (el de saturación) a partir del cual ya no varía. También se verifica lo contrario: al decrecer la entrada, la salida cae hasta saturarse en un valor mínimo. En el biestable, la salida de cada amplificador se halla invertida (esto es, multiplicada por −1) y conectada a la entrada del otro. Los amplificadores se inhiben mutuamente porque una salida elevada de cualquiera de ellos hundirá la entrada del otro. Tal proceder da un funcionamiento autoconsistente, porque cada amplificador fuerza al otro hacia el estado contrario al suyo. El biestable tiene, por consiguiente, dos estados estables: si el amplificador *A* genera una salida +1, el *B* tendrá que dar salida −1, y viceversa. El rasgo a destacar en este circuito es que la clave de su estabilidad estriba en su esquema de conexiones, que determina la forma de sus estados estables.

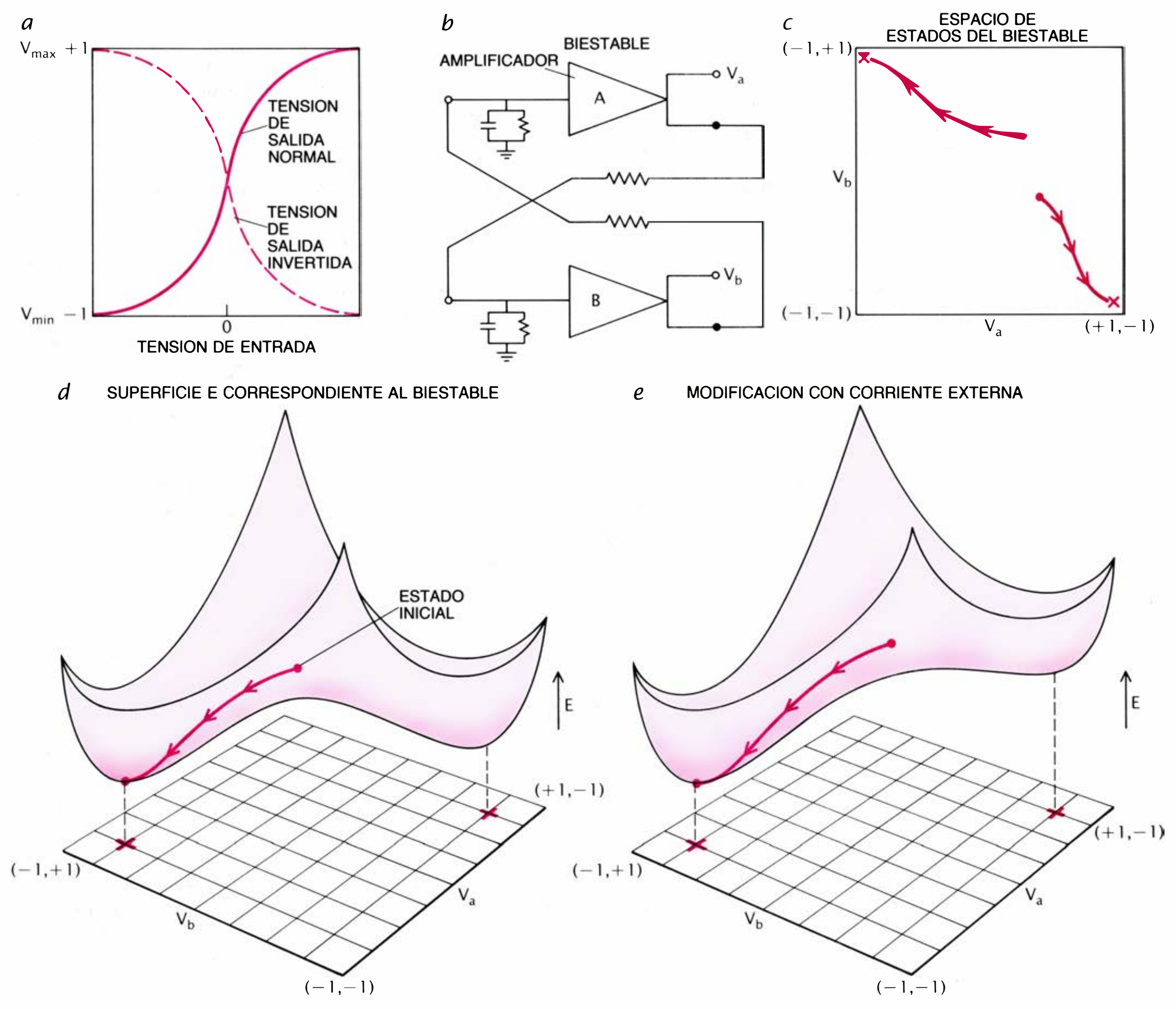
Una peculiaridad cuando menos curiosa del biestable es que, sean cuales fueren las entradas iniciales que se le suministren al circuito en el momento de ponerlo en servicio, describirá una rápida trayectoria hasta uno de los estados estables. Para comprender tal fenómeno, imaginemos lo que sucede al caer una gota de lluvia sobre un terreno accidentado, formado por colinas y valles. Por lo general, la gota correrá ladera abajo, hasta acabar en el fondo de un valle cercano. En razón de la trayectoria seguida, la energía potencial gravitatoria de la gota decrecerá continuamente. De modo análogo, la trayectoria del biestable se encuentra asociada a una magnitud matemática que llamamos *E*, energía computacional, que podemos representar en el terreno donde la tensión de estado del biestable procede continuamente en sentido descendente.

La magnitud *E* se define por una fórmula que depende de las características de los amplificadores, de la intensidad de las conexiones excitadoras e inhibidoras mutuas y de cualesquiera otras entradas externas. Supuestas fijas las entradas de un circuito, si se calcula *E* para cada una de las posibles configuraciones de tensiones de los amplificadores, queda definida una superficie continua. En el caso del biestable, *E* puede representarse gráficamente sobre unos ejes tridimensionales [*véase la figura 3*]. La superficie posee dos valles en la vecindad de las configuraciones de tensiones (+1,−1) y (−1,+1), que corresponden a los dos estados estables. Con el circuito en funcionamiento, las tensiones variables describirán un movimiento descendente por

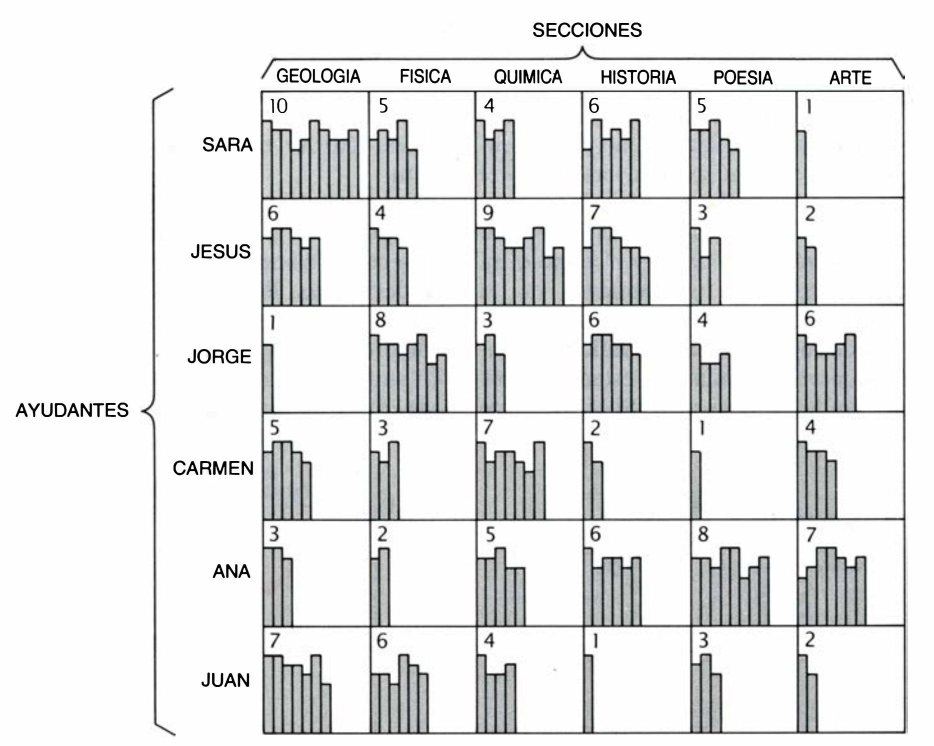
las laderas de la superficie de energía computacional, y la configuración terminará por quedar en reposo en el fondo de uno de los valles.

La noción de energía computacional resulta útil para comprender muchas de las características de los circuitos de decisión conjunta. Por ejemplo, las modificaciones del circuito biestable alteran la forma de la superficie *E* de unas maneras muy definidas. Si se aumentan las intensidades de las conexiones inhibidoras, los valles se hunden más respecto del "punto neutro", o de ensilladura, que se halla en medio de la superficie *E*. Las fuentes de corriente externa alteran también los contornos de la superficie; si se suministra corriente positiva a la entrada de uno de los amplificadores, tenderá a llevarlo hacia el estado de salida +1. El valle correspondiente a esa configuración estable se hundirá más todavía y el cambio irá acompañado de un aumento de la "cuenca de atracción", que es la porción de superficie donde cualquier punto de partida conduce al estado estable del fondo de la cuenca. Si la corriente externa es suficiente, la cuenca de atracción llenará por completo el espacio del biestable y eliminará el valle correspondiente al otro estado estable; habrá sólo un estado estable por circuito.

El sencillo circuito biestable ilustra la interpretación del seguimiento de una trayectoria como proceso de adopción de decisiones. Por ejemplo, el circuito puede decidir cuál es el mayor de dos números si se inyectan en la entrada de los amplificadores dos corrientes externas que resulten proporcionales a di-



3. CIRCUITO BIESTABLE, también conocido por *flip-flop*. Consta de dos amplificadores saturables, en los que, al aumentar o disminuir la tensión de entrada, la salida se satura a una tensión máxima o mínima. La salida puede ser normal o invertida (*a*). Una resistencia conecta la salida de un amplificador a la entrada del otro; su valor óhmico determina la fuerza de la conexión. Puede utilizarse el terminal de salida normal (*circulito en blanco*) para establecer una conexión excitadora. En el caso del biestable, se utiliza el terminal de salida invertida (*circulito negro*), para establecer conexiones inhibidoras. En paralelo con cada entrada se conectan una resistencia y un condensador destinados a almacenar la carga que fluye hacia el terminal y producir una tensión de entrada, así como para permitir que fluya una corriente de descarga (*b*). Si denotamos por +1 y −1 las salidas mínima y máxima, y si el amplificador *A* se encuentra saturado en +1, la entrada de *B* se verá obligada a descender, y la salida de *B* quedará saturada en −1. A su vez, la salida de *B* se invertirá e incrementará la entrada de *A*, manteniéndose saturada la salida de *A* en +1. La situación inversa, en la cual *A* se encuentra saturado en −1 y *B* saturado en +1, también es estable. Cabe representar la configuración de las tensiones del amplificador como un punto de un plano (*c*). Cada eje representa la salida de uno de los amplificadores, que irá desde −1 hasta +1. El circuito basculará siempre hacia uno de los dos puntos estables próximos a (+1,−1) y a (−1,+1), sean cuales fueren las tensiones iniciales. Un tercer eje representa el valor de la energía computacional *E* correspondiente a cada configuración de tensiones (*d*). Los dos puntos estables adoptan la apariencia de valles en la superficie *E*. Los bordes de la superficie se elevan empinadamente, porque es imposible exceder las salidas mínima y máxima. Si se le proporciona a uno de los amplificadores una corriente externa, se ahonda el valle correspondiente al que se encuentra en el estado +1 (*e*).



TASA TOTAL DE RECOLOCACION = 40

SARA A GEOLOGIA					
		JESUS A QUIMICA			
	JORGE A FISICA				
					CARMEN A ARTE
				ANA A POESIA	
			JUAN A HISTORIA		

SOLUCION OPTIMA: TASA TOTAL = 44

SARA A GEOLOGIA					
			JESUS A HISTORIA		
					JORGE A ARTE
		CARMEN A QUIMICA			
				ANA A POESIA	
	JUAN A FISICA				

4. PROBLEMA DE ASIGNACION de tareas. Se pide encomendar a cada ayudante la recolocación de las colecciones de libros. La tabla superior expone los ritmos de reposición de libros a sus estantes, expresadas en libros por minuto. En el problema de seis por seis, son 720 las formas de asignar las tareas. Abajo, dos de las posibilidades. La asignación óptima será la que proporcione máxima suma de tasas de reposición.

chos números. El amplificador que reciba la mayor señal de entrada poseerá un valle más profundo en el estado estable para el que da salida +1, y su cuenca de atracción se expandirá hasta abarcar el "punto neutro". Si se diera comienzo a la computación ajustando las tensiones en ese punto, el estado del circuito seguiría una senda descendente hacia el valle más profundo. Una vez estabilizado el circuito, comprobaríamos cuál de los amplificadores se encuentra en el estado +1 y determinaríamos de ese modo qué número es el mayor. Cualquiera que sea el par de números en cuestión, las correspondientes intensidades de corriente de entrada provocarán que la superficie *E* cambie en la forma apropiada, garantizando así que la senda conduzca a la solución correcta.

En el caso de circuitos de decisión conjunta más complicados, la superficie *E* correspondiente adquiere tantas dimensiones que resulta imposible dibujarla. No obstante, podemos comprender los rasgos generales de la superficie y valernos de ellos para diseñar e interpretar los circuitos. Por ejemplo, a partir de la superficie *E* del biestable, cabe realizar una generalización que permita idear un circuito de decisión colectiva capaz de resolver el problema, algo más difícil, de la determinación del máximo de un conjunto de *n* números. Imagínese tal circuito como un *n*estable compuesto por *n* amplificadores, cada uno de ellos conectado a todos los demás a través de enlaces inhibidores de igual intensidad. Tal circuito tendría *n* estados estables y, su superficie *E*, *n* valles. Al suministrar a sus amplificadores un juego de *n* corrientes de entrada, el estado que diera salida +1 para el amplificador que recibiera la mayor entrada desarrollaría el valle más profundo.

Tanto en el circuito biestable como en el *n*estable existe una correspondencia biunívoca entre el número de amplificadores y el de soluciones posibles; al crecer el número de soluciones, crece también el tamaño del circuito. ¿Será posible diseñar un circuito colectivo capaz de representar un número de soluciones mayor que el de amplificadores? Ya existen esos circuitos. Poseen estados estables formados por *configuraciones* de amplificadores en estado +1. Ello representa un modo más económico de empleo de los amplificadores, lo mismo que, en lo tocante a la codificación de palabras por medio de símbolos, el alfabeto latino es más económico que los ideogramas chinos.

En 1984 descubrimos que ese tipo de redes podrían calcular rápidamente soluciones válidas de problemas de optimización, tales como el de la asignación de tareas antes mencionado. A título de ejemplo, imaginemos que tengamos a nuestro cargo la supervisión de la tarea de recolocar en sus estantes los libros de un gran biblioteca. Disponemos para ello de varios ayudantes. Todos ellos están familiarizados con las distintas secciones y colecciones de historia, física, etcétera, de la biblioteca, pero no en el mismo grado. Así, por ejemplo, Jesús es capaz de reponer seis libros por minuto en la sección de geología, cuatro por minuto en la de física, y así sucesivamente, mientras que Jorge alcanza a colocar un libro por minuto en geología, ocho por minuto en física, etcétera. Es preciso asignar una categoría a cada ayudante. ¿Cómo realizar el reparto de tareas de modo que el ritmo global de reposición sea lo más alto posible?

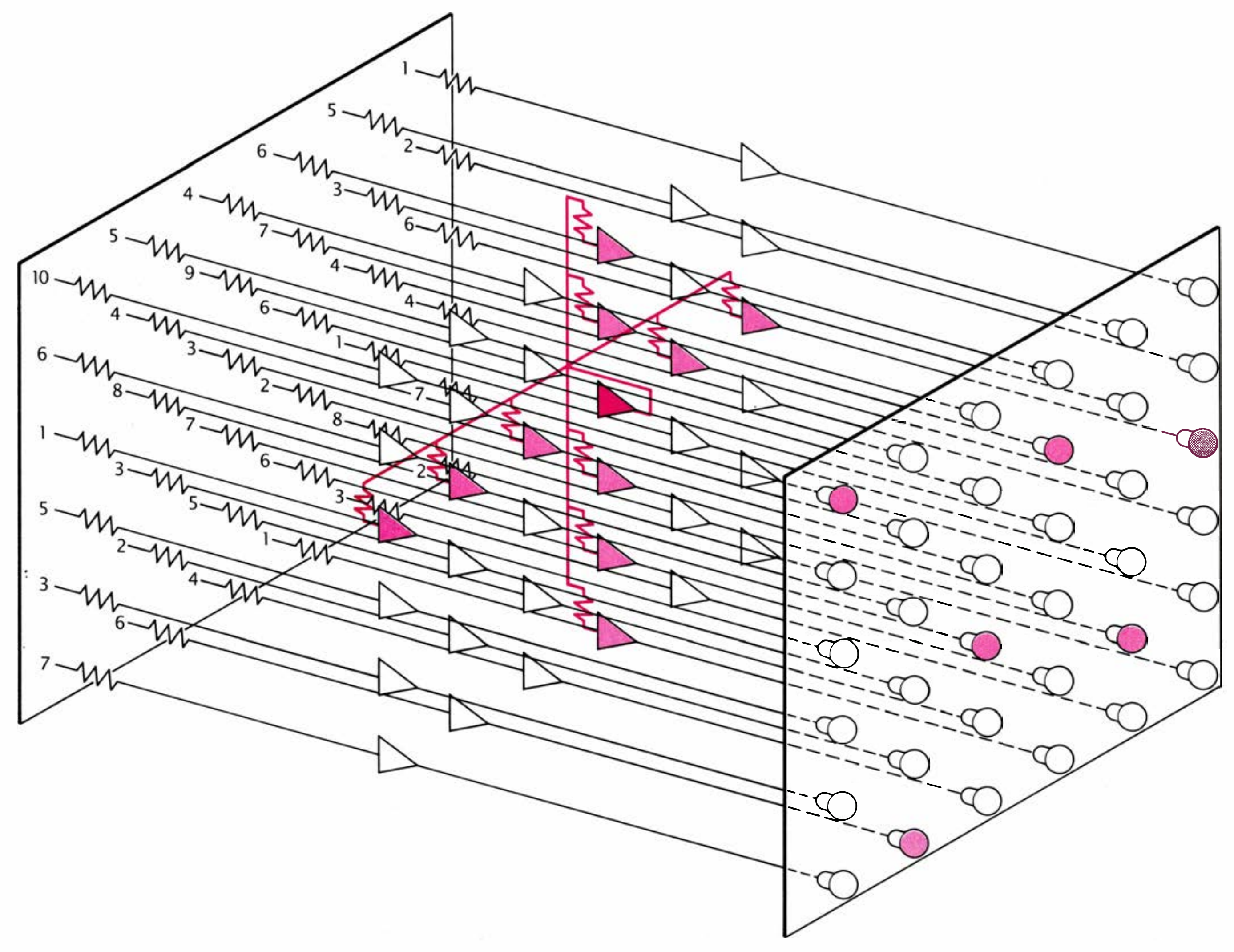
Puede abordarse el problema por la fuerza bruta, ensayando una tras otra todas las combinaciones posibles. Pero si el número de colecciones y de auxiliares es grande, pronto nos veríamos desbordados por la cantidad de posibilidades. Si fueran *n* las categorías de libros, y *n* también el número de ayudantes, el número de soluciones posibles sería la factorial de *n*, esto es,

$n(n-1)(n-2)\ldots1$. Los ordenadores digitales cuentan con algoritmos muy superiores, de carácter iterativo, capaces de llegar a una solución en un tiempo proporcional a n elevado al cubo. Sin embargo, el cómputo podría efectuarse aún más rápidamente si se pudiera sacar pleno partido de la esencia del problema, a saber, del hecho mismo de que la asignación idónea de tarea a cada auxiliar está en función de las capacidades de todos los demás. Lo ideal sería tener en cuenta tales dependencias mutuas a la vez. Son precisamente los cómputos de ese tipo los que realizan con gran rapidez y eficacia los circuitos de decisión conjunta.

En el problema de asignación de tareas, los datos son el conjunto de ritmos, o tasas, de reposición. Pueden organizarse en una tabla, en la cual cada fila contiene las tasas de un ayudante y cada columna corresponde a una categoría de libros. Puede concebirse una asignación de tareas como una elección de n elementos de la tabla, con la restricción de que se haya elegido un elemento, y solamente uno, en cada fila y cada columna, pues sólo podemos asignar un auxiliar de biblioteca a cada categoría. La solución óptima es la que logra hacer máxima la suma de las tasas de recolocación de los ayudantes elegidos.

Resolvimos el problema construyendo una matriz de n por n amplificadores, en la que cada fila correspondía a un ayudante y, cada amplificador de la fila, a una tarea diferente. Los amplificadores de cada fila y columna se enlazaron mediante conexiones mutuamente inhibidoras; se imponía así la restricción de que sólo se asignara un ayudante a cada colección: si uno de los amplificadores daba salida +1, los demás amplificadores se inhibían. Otra forma de interpretar el circuito consiste en considerar que cada fila y cada columna configuran un circuito *n*estable, un *n*flop. Sin embargo, los *n*estables no pueden funcionar independientemente, porque cada amplificador pertenece a dos de tales *n*estables. Como veremos más adelante, la clave del circuito reside en ese patrón de conexiones: asegura que el circuito posea estados estables autoconsistentes, que corresponden a posibles soluciones del problema.

¿Cuáles son los estados estables de esta red y qué aspecto presenta su superficie E? Los estados estables consisten en configuraciones de 36 amplificadores, en las cuales sólo seis dan salida +1, con un amplificador, y solamente uno, en cada fila y en cada columna. En una matriz de seis por seis, el número de tales estados estables es de 720, es decir, factorial de 6. La superficie E correspondiente al circuito presenta valles de iguales profundidades para cada una de esas 720 posibi-



5. CIRCUITO DE OPTIMIZACION destinado a resolver el problema de asignación de tareas [*véase la figura 4*]. Consiste en una red de *n*estables interconectados. Los amplificadores de cada fila y cada columna están enlazados por medio de conexiones inhibidoras, que establecen la restricción de que sólo un amplificador de cada fila y columna dada puede hallarse en estado +1. Dado que cada uno de los 36 amplificadores de esta red inhibe a otros 10, hay, en total, 360 conexiones. El diagrama ilustra las conexiones correspondientes a uno de los amplificadores. Reciben éstos corrientes de entrada proporcionales a las tasas de recolocación. Los amplificadores correspondientes a la solución óptima —la combinación de entradas que contribuyen a la suma máxima— exhiben un +1 y, los demás, un 0. Las salidas +1 pueden gobernar un panel de presentación, por ejemplo, una matriz de lamparitas piloto. (Dibujos de Gabor Kiss.)

lidades. En el correspondiente amplificador se inyecta una corriente de entrada proporcional a la tasa de recolocación de cada ayudante en cada colección. El valle correspondiente a cada posible solución se hace más profundo en una cuantía proporcional a la suma de las tasas de recolocación asociadas.

La red efectúa la computación siguiendo una trayectoria descendente por la superficie E. En la configuración final, el circuito suele estabilizarse en el valle más profundo, que es la elección correcta, porque corresponde a la asignación de puestos que determina una tasa máxima de recolocación. Hemos demostrado en estudios de simulación que ese circuito en particular determinará casi siempre la solución óptima del problema, y que un circuito ligeramente más complejo la hallará siempre.

Una de las razones de que nos interese el estudio de este tipo de circuito reside en el fenómeno siguiente: a menudo, los problemas perceptuales pueden expresarse como una optimización. Nuestros sentidos recogen una cantidad ingente de información relativa al mundo exterior, información inevitablemente imprecisa y mezclada con "ruido". Puede que el borde de un objeto se oculte tras otro objeto. Pero sabemos que los bordes de los objetos son continuos, y no ver uno de sus bordes no nos hace pensar que el objeto haya cambiado de forma. Nuestra interpretación de la información está condicionada por lo que ya sabemos.

Con frecuencia resulta posible representar tal conocimiento mediante un sistema de restricciones, análogas a las del problema de reparto de tareas, y expresarlo a través de una función de tipo E. El problema perceptual equivale entonces a la determinación del valle más profundo de la superficie E. En ese contexto, Cristof Koch, José Marroquín y Alan Yuille, a la sazón en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, demostraron que diversos problemas de interés en visión por ordenador podían formularse como problemas de optimización y que los resolvía un circuito de decisión conjunta en el que el conocimiento del mundo real se concretaba en un sistema de restricciones. El circuito que concibieron fue capaz de tomar información, incompleta en lo tocante a la profundidad, de un mundo tridimensional y de reconstruir la información no proporcionada, por ejemplo, las posiciones de los bordes de objetos.

Otra aplicación de especial interés de los circuitos de decisión colectiva estriba en la llamada memoria asociativa, que es reductible también a cierta forma de un problema de optimización. La noción de memoria asociativa difiere intrínsecamente de la memoria de un ordenador digital. Un ordenador convencional va almacenando informaciones por el procedimiento de asignarles direcciones, que permiten identificar las posiciones físicas de los elementos materiales (*hardware*) donde se almacenarán los datos: un sector o una pista de un disco flexible, por ejemplo. Cuando el procesador central necesita un dato, emite una instrucción destinada a leer el dato que ocupa una posición particular. La dirección propiamente dicha no contiene información relativa a la naturaleza de los datos que se almacenan en ese punto.

Reflexionemos por un instante en nuestros propios recuerdos. Si pensamos en una persona amiga, nos vendrán a la memoria muchos datos: nombre, edad, color del pelo, estatura, ocupación, aficiones, formación académica, familia, casa, experiencias que hemos compartido, etcétera. Todos esos hechos se articulan y constituyen nuestro recuerdo de esa persona. La forma en que recobramos de nuestra memoria recuerdos como ésos nada tienen que ver con la noción de dirección de almacenamiento. En lugar de direcciones de almacenamiento se utilizan fragmentos de la propia información.

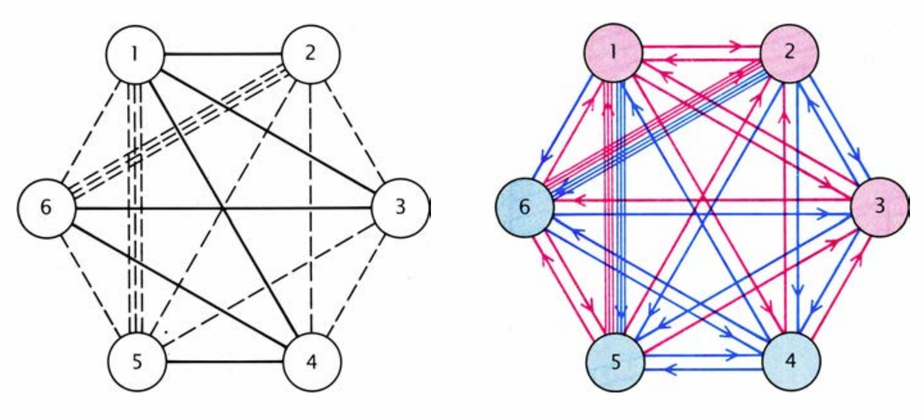
La noción de memoria asociativa procede de la psicología, no de la in-

CARACTERISTICAS ASIGNADAS A LOS NODOS

	1 NOMBRE	2 ESTATURA	3 EDAD	4 PESO	5 CABELLO	6 OJOS
−1	SANTOS	ALTO	VIEJO	DELGADO	CASTAÑO	AZULES
+1	GARCIA	BAJO	JOVEN	GORDO	RUBIO	CASTAÑOS

NODOS

RECUERDOS	1	2	3	4	5	6
A	+1	+1	+1	−1	−1	−1
B	+1	−1	+1	+1	−1	+1
C	+1	+1	−1	+1	−1	−1



6. MEMORIA ASOCIATIVA compuesta por seis nodos, llamados "neuronas". Dispone de una serie de conexiones excitadoras (*líneas continuas*) e inhibidoras (*líneas a trazos*). El número de líneas de cada enlace representa la intensidad de la conexión; cada línea continua representa una intensidad de conexión de +1, y cada línea a trazos una intensidad de −1. A cada nodo correspondería una característica de una persona, como vemos en la tabla superior. Supongamos que se quieran almacenar tres recuerdos, esto es, tres conjuntos de características (*centro*). A los nodos que supuestamente han de hallarse en el estado +1 se les proporciona un enlace excitador con los demás nodos +1 y un enlace inhibidor con los nodos −1. Para almacenar información relativa a los tres recuerdos basta sumar las conexiones. Por ejemplo, el enlace entre los nodos 2 y 4 es (−1) + (−1) + (+1), esto es, −1. Cuando el circuito se pone en marcha para el recuerdo *A*, la red produce (*abajo, a la derecha*) la configuración correcta de nodos en estado +1 (*rojo*) y −1 (*azul*). La configuración es autoconsistente: en cada nodo, las corrientes positivas (*rojo*) y negativas (*azul*) que confluyen en él siempre tienen, al sumarse, el mismo signo que el propio nodo. Si se proporcionan a la red datos parciales, la red pasará a un estado estable desde el cual se puede recobrar el recuerdo entero.

geniería eléctrica. Las moscas del vinagre y las babosas de jardín tienen memoria asociativa. Más todavía, el hecho mismo de que sistemas nerviosos relativamente tan sencillos como los citados exhiban tal fenómeno hace pensar que la memoria asociativa sea una propiedad natural casi espontánea de las agrupaciones de neuronas. Parece razonable preguntarse si sería posible conseguir memoria asociativa en redes de dispositivos artificiales pseudoneuronales. A lo largo del decenio de 1970, varios investigadores, entre quienes se cuentan James A. Anderson, de la Universidad de Brown, y Teuvo Kohonen, de la de Helsinki, desarrollaron modelos matemáticos de la memoria asociativa. La noción de superficie E brinda un medio de comprender y estudiar circuitos de memoria asociativa, construidos a partir de amplificadores saturables.

¿Cómo lograr que un circuito de decisión conjunta, o colectiva, se comporte como una memoria asociativa? Imaginemos un espacio de muchas dimensiones cartesianas, cada uno de cuyos ejes estuviera rotulado con uno de los atributos que puede tener una persona. Un eje sería el de estaturas; otro, el de color del cabello; éste el de peso, aquél, el de su experiencia como navegante; el de más allá, su nombre de pila; otro más, su ciudad de residencia, y así sucesivamente. Cada uno de los puntos de este espacio describe las características de un individuo hipotéticamente posible. Cada uno de nuestros amigos está representado por un punto particular de ese espacio. Dado que el número de nuestros amigos es muy pequeño en comparación con el conjunto de todos los individuos posibles, si pusiéramos una marca en la posición de cada una de las personas que conocemos, serían muy pocos los puntos marcados en el seno de un espacio muy grande. Cuando alguien nos facilita información parcial acerca de una persona, por ejemplo, su color de pelo y el peso, pero no el nombre, está describiendo aproximadamente una posición en el espacio de gente posible. La idea de memoria asociativa consiste en hallar, entre nuestros conocidos, aquel que mejor se ajuste a los datos parciales.

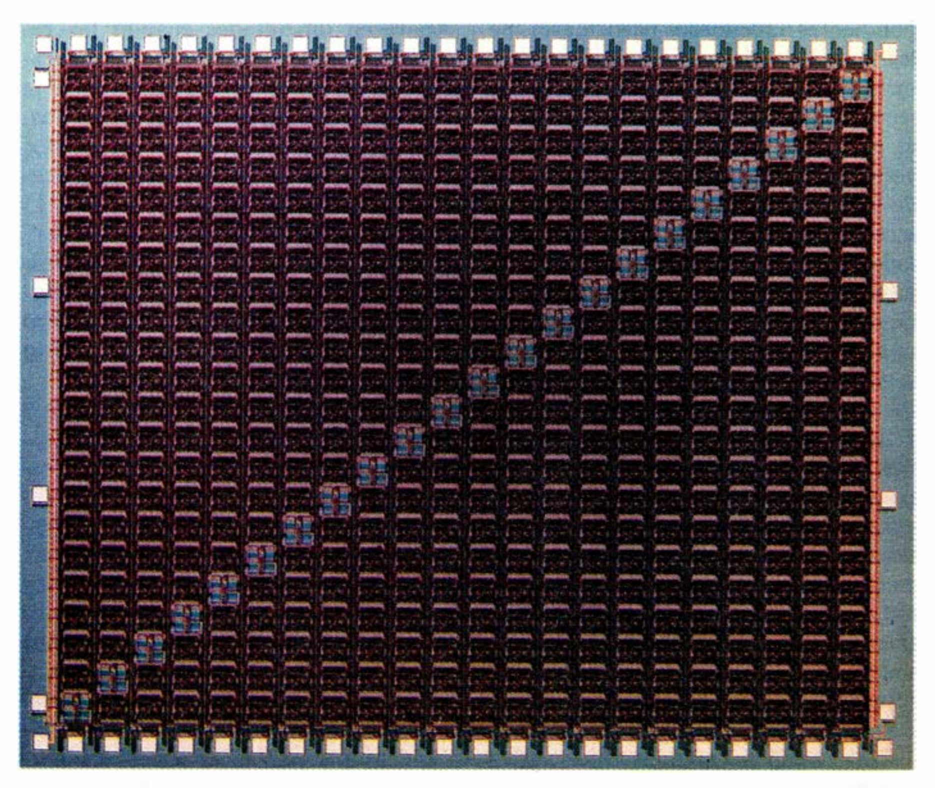
Un circuito de decisión conjunta como el descrito para el problema de asignación de tareas podría comportarse como una memoria asociativa si pudiera dársele a la superficie E una forma tal que presentara valles, esto es, puntos estables, en los lugares correspondientes a recuerdos particulares. Se les suministraría a los amplificadores un patrón de tensiones de entrada correspondientes a un recuerdo parcial y el circuito seguiría entonces una trayectoria conducente al fondo de un valle local del territorio E; y mostraría, a modo de recuerdo almacenado, los estados de salida de los amplificadores. A diferencia del circuito de asignación de tareas, en el cual las conexiones forman una estructura muy regular merced a la sencillez de las reglas globales impuestas al problema, en una memoria asociativa los puntos estables se encuentran distribuidos más o menos al azar, porque no es preciso que los recuerdos guarden entre sí ninguna relación particular. Por consiguiente, para construir una memoria asociativa deben hallarse conexiones entre amplificadores tales que los numerosos recuerdos deseados se encuentren simultáneamente representados por los estados estables del circuito.

Una sencilla memoria asociativa compuesta por seis amplificadores interconectados ilustra cuánta información puede almacenarse en semejante red [*véase la figura 6*]. Los estados de memoria del sistema se describirían mediante palabras binarias de seis bits, en las cuales cada bit correspondería a uno de los dos posibles estados saturados de un amplificador, $+1$ y -1. Por ejemplo, el recuerdo A es $(+1,+1,+1, -1,-1,-1)$. Lo mismo que en el circuito biestable, un estado sólo puede ser estable si es autoconsistente. Ello se logra asegurándose de que todos los amplificadores que den salida $+1$ establezcan una conexión excitadora a la entrada de todos los demás amplificadores que tengan salida $+1$, y una conexión inhibidora a la entrada de los amplificadores con salida -1; y viceversa para los amplificadores con salidas -1. Se suman, para cada amplificador, todas las entradas y se obtiene una gran señal de signo correcto. Si se observa la superficie E correspondiente a esa memoria asociativa, se descubrirá que las conexiones han creado un valle en la posición de la memoria.

Puesto que los datos se encuentran distribuidos en la configuración de las conexiones, en un mismo circuito pueden superponerse otros muchos "recuerdos". Basta calcular por separado las conexiones correspondientes a cada recuerdo y sumarlas después a las conexiones correspondientes a los recuerdos ya almacenados. Esa sencilla regla aditiva funciona en tanto no sea excesiva la compartición de unas mismas conexiones por multitud de recuerdos. Aparecen dificultades cuando los recuerdos son demasiado parecidos o excesivamente numerosos: los valles de la superficie E, al quedar muy próximos, interactúan. (El número de recuerdos no relacionados que pueden almacenarse eficazmente es del orden del 15 por ciento del número de "neuronas" que componen el circuito.) Existen esquemas de interconexión más ingeniosos, capaces de almacenar gran número de recuerdos, o recuerdos que sean más parecidos.

Para modificar la fuerza de la conexión que une dos "neuronas" enlazadas, la memoria asociativa recién descrita sólo precisa información local relativa a las mismas. Circunstancia que resulta especialmente atractiva porque brinda una teoría de la memoria asociativa coherente con un modelo biológico propuesto hace más de 30 años por Donald O. Hebb. Este autor postuló que la memoria biológica asociativa debía residir en las conexiones sinápticas que establecen las células nerviosas, y que los procesos de aprendizaje y de almacenamiento de recuerdos modificarían la intensidad con la que las señales nerviosas se transmiten a través de las sinapsis. Según esa teoría, las sinapsis que enlazan pares de neuronas que se encuentran simultáneamente activas cobran mayor vigor, reforzando en consecuencia aquellas sendas intracerebrales que son excitadas por experiencias específicas. Lo mismo que en nuestro modelo de memoria asociativa, ello provoca cambios locales en las conexiones y no cambios globales. La sinapsis postulada por Hebb escapó durante muchos años a la observación real, pero recientemente han sido varios los investigadores que han presentado pruebas de la existencia en el cerebro de tales mecanismos.

En muchos laboratorios se están explorando métodos de fabricación y empleo de dispositivos de computación conjunta. Se han construido ya diversos prototipos mediante tecnología convencional de microcircuitos y tecnologías ópticas. Para ser de utilidad, los circuitos tendrán que ser grandes y disponer de centenares o millares de "neuronas"; y dado que éstas pueden encontrarse densamente interconectadas, los circuitos quizá contengan decenas de millares, o millones incluso, de conexiones. Además, para construir un circuito de aplicación general, lo que podría ser una "pastilla" de memoria asociativa, deberá disponerse de un procedimiento sencillo para modificar la intensidad de las conexiones.



7. CIRCUITO DE DECISION CONJUNTA construido en tecnología VLSI (integración a muy gran escala), diseñado en el Instituto de Tecnología de California por Massimo Sivilotti, Michael R. Emerling y Carver A. Mead. Contiene 22 amplificadores (los componentes de color claro dispuestos en diagonal). Los dispositivos que llenan el resto del cuadrado sirven para establecer las conexiones, que pueden programarse para convertir el microcircuito en una memoria asociativa. La pastilla mostrada mide seis por seis milímetros.

En el Laboratorio de Propulsión a Chorro, John J. Lambe y sus colaboradores construyeron, con amplificadores insertos en un circuito integrado, la primera red de memoria asociativa del tipo descrito. Mediante interruptores mecánicos se escogieron las conexiones entre cada pareja de amplificadores. Se amplió la red para que contuviera 32 amplificadores y se sustituyeron los conmutadores mecánicos por dispositivos transistorizados gobernados por microcomputador. Esos circuitos prototipo funcionaron según lo previsto, pero resultaban demasiado engorrosos para su uso práctico. La primera versión en integración a muy gran escala (VLSI) fue obra de Massimo Sivilotti, Michael R. Emerling y Carver A. Mead, del Instituto de Tecnología de California (Caltech). El microcircuito consiguió condensar una red de 22 amplificadores provista de 462 interconexiones en una superficie de menos de un centímetro cuadrado; una vez programada debidamente su matriz de interconexiones, el circuito funcionó como memoria asociativa. Circuitos de VLSI similares, provistos de 54 amplificadores, han sido construidos por Lawrence D. Jackel, Richard E. Howard y Hans Peter Graf, de los Laboratorios AT&T Bell. Una de las características más atractivas de los circuitos de decisión conjunta es que convergen rápidamente hacia la solución adecuada: de ordinario, en unos pocos múltiplos del tiempo característico de respuesta de los circuitos de cómputo. En varios de los dispositivos realizados, tal convergencia se ha producido en menos de un microsegundo. El grupo de Mead ha construido recientemente, en integración a muy gran escala, un microcircuito concebido como "retina artificial", destinado a procesamiento de imágenes, cuyo diseño se funda en principios de computación conjunta.

La óptica avanzada proporciona otro prometedor entorno de construcción de circuitos de decisión colectiva. En ese campo, los cables de conexión se remplazarían por haces luminosos. Dado que esos haces pueden atravesarse sin interacción mutua, se abre la posibilidad de preparar redes de interconexión de topología compleja, difíciles de fabricar mediante VLSI. Demetri Psaltis, del Caltech, y Nabil Farhat, de la Universidad de Pennsylvania, han construido prototipos operativos de circuitos ópticos [véase "Computadoras ópticoneuronales", por Yaser S. Abu-Mostafa y Demetri Psaltis; en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1987].

Muchos investigadores están estudiando circuitos pseudoneuronales distintos de los aquí descritos. Un modelo popular es el "perceptrón de proalimentación" (*feedforward Perceptron*), que ha demostrado su eficacia en una amplia gama de aplicaciones, como el reconocimiento de configuraciones. El modelo consta de unidades sencillas de procesamiento dispuestas en varios estratos. La información se introduce en el sistema a través de un estrato de recepción; el resultado de la computación de la red se lee en el estrato de salida.

Los distintos niveles están conectados, pero la información sólo fluye hacia delante. Tales redes proalimentadas exhiben un comportamiento dinámico relativamente simple y una capacidad computacional más bien reducida. Por otra parte, se han ideado para tales circuitos muchas reglas útiles de aprendizaje para las que resulta sencillo establecer la configuración de conexiones idónea. David Parker, David Rumelhart, Geoffrey Hinton y Ronald Williams, e, independientemente, Paul J. Werbos han deducido un conocido ejemplo: la retropropagación. Uno de los objetivos de las investigaciones en curso es esclarecer la posible aplicación de algoritmos de aprendizaje similares a redes dotadas de los ricos comportamientos dinámicos resultantes del tipo de realimentación que se utiliza en los circuitos explicados aquí.

El estudio de la computación conjunta en circuitos pseudoneuronales ha revelado que esas redes pueden llevar a cabo computaciones no triviales. Cómputos más complicados quizás exijan la interacción de muchas decisiones sencillas al objeto de producir una decisión compleja. Otra peculiaridad de muchas decisiones complejas es que han de considerar informaciones que llegan en el transcurso de un prolongado período temporal. Imaginemos, por ejemplo, que se desee identificar a una persona por sus andares. Sería preciso efectuar decisiones sencillas referentes a las posiciones de sus extremidades, combinar éstas a lo largo del tiempo para determinar una secuencia de movimientos y, a partir de éstos, formar una pauta compleja que pueda quedar asociada con un sujeto determinado. El estudio de tales sistemas jerárquicos de decisión colectiva, capaces de tener en cuenta las variaciones a través del tiempo, está en mantillas. Estamos convencidos, sin embargo, que al igual que ha ocurrido con los principios de diseño de circuitos que hemos descrito, la investigación se verá impulsada por las arquitecturas y reglas de diseño de los ordenadores naturales.

Paleomagnetismo lunar

La Luna, hoy un cuerpo muerto, engendró, tiempo atrás, su propio campo magnético. Desde entonces, se ha descentrado respecto al eje de rotación, tal vez por choques con satélites suyos

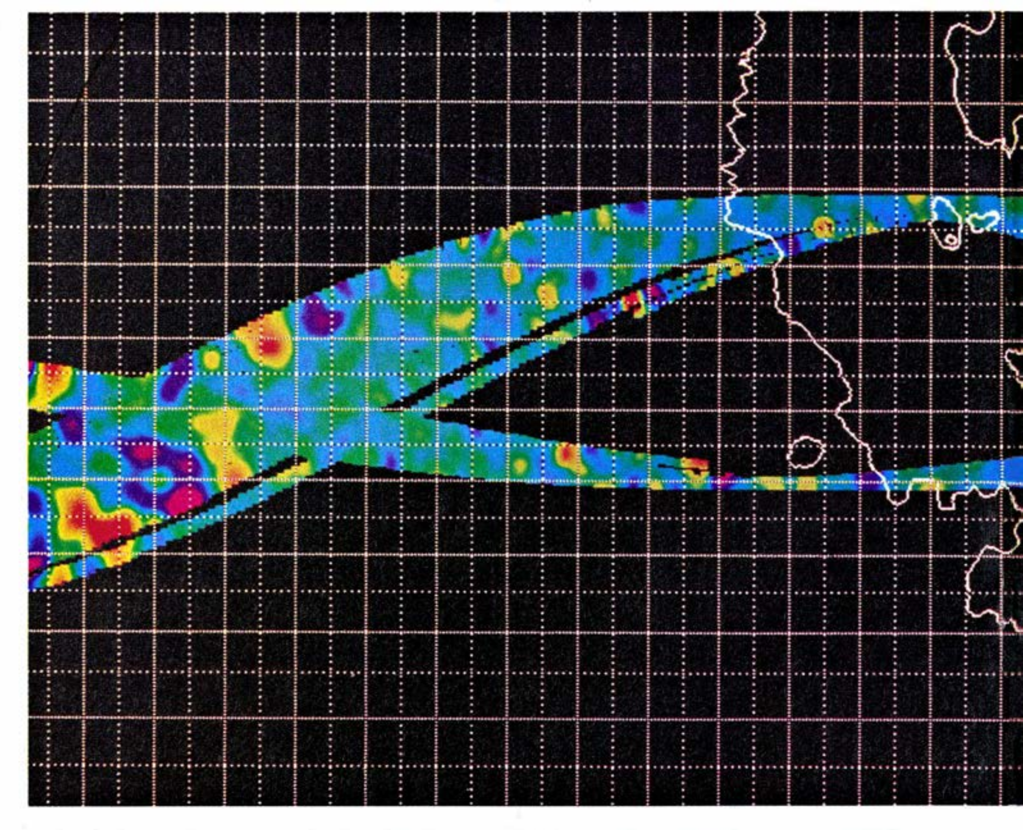
S. K. Runcorn

Cuando el *Apolo 11* se posó en la superficie lunar, en julio de 1969, había general acuerdo en que la Luna era un cuerpo muerto. Se sabía que sus irregularidades superficiales obedecían, en gran parte, a procesos externos y no, como en el caso de la Tierra, a procesos internos. Se había demostrado en ese sentido que la inmensa mayoría de los cráteres lunares no procedían de volcanes –según habían supuesto Galileo y la mayor parte de los geólogos posteriores–, sino que los había causado el bombardeo meteorítico a lo largo de miles de millones de años. La Luna no había conocido fenómenos atribuibles a grandes movimientos de la corteza (tales como la deriva continental que ocurre en la Tierra). Se creía que tampoco poseía núcleo de hierro, porque la densidad lunar media es muy próxima a la de los silicatos de hierro y magnesio que constituyen el manto superior de nuestro planeta.

De las consideraciones teóricas, cabía esperar, pues, una Luna muerta. Cuerpo tan pequeño habría perdido su calor interno antes que la Tierra, porque la relación de área a volumen es mucho mayor que en ésta. A nadie debía sorprender, por tanto, que la Luna no mostrase campo magnético, ni tectónica de placas. En la Tierra hay todavía energía calorífica suficiente para impulsar los movimientos del núcleo fundido que producen el campo magnético y para alimentar el flujo, mucho más lento, del manto viscoso (capa entre el núcleo y la litosfera, o capa superficial rígida), que induce la tectónica de placas. La hipótesis que consideraba la Luna como un cuerpo indiferenciado e internamente inactivo pareció confirmarse en septiembre de 1959, cuando la sonda soviética *Luna 2* mostró que carecía de campo magnético detectable.

Sin embargo, un examen detallado de las muestras lunares traídas a la Tierra por las misiones Apolo comenzó a revelar una historia diferente. Algunas se hallaban magnetizadas, lo que implicaba que habían estado sometidas a campos magnéticos en el tiempo de su formación. Además, las sondas lunares empezaron a detectar allí anomalías magnéticas –regiones con campo magnético procedente de formaciones rocosas–. Los análisis de estos descubrimientos por el autor y sus colegas, así como por otros grupos, sugerían una hipótesis sorprendente: la Luna había poseído tiempo atrás su propio campo magnético, notablemente intenso. En alguna época, dicha intensidad pudo haber casi doblado la que presenta el actual campo magnético terrestre.

Parece que en períodos distintos de la historia de la Luna, su campo magnético apuntaba en direcciones diferentes con respecto a la corteza. El autor y sus colaboradores han calculado las intensidades y direcciones del paleomagnetismo lunar, con unos resultados que tienen notables consecuencias en relación con la naturaleza de la Luna y la historia del sistema Tierra-Luna. Parece así que el satélite entero se ha corrido varias veces respecto a su eje de rotación. Si bien éste ha mantenido su orientación y posición en el espacio, la



1. MAPA MAGNETICO DE LA LUNA, basado en datos recogidos por los vehículos orbitales norteamericanos *Apollo 15* y *Apollo 16*. Dibuja los campos que provienen de estratos imanados de la corteza. Según la hipótesis del autor, los estratos fueron imanados, entre 3600 y 4200 millones de años atrás, por un campo generado en el interior lunar. Esta imagen de ordenador nos muestra la componente radial (vertical) del campo magnético. Las zonas verdes, amarillas y rojas representan regiones donde el campo apunta fuera de la superficie; el rojo indica el campo más intenso (unos 0,5 nanotesla, una cienmilésima del campo mag-

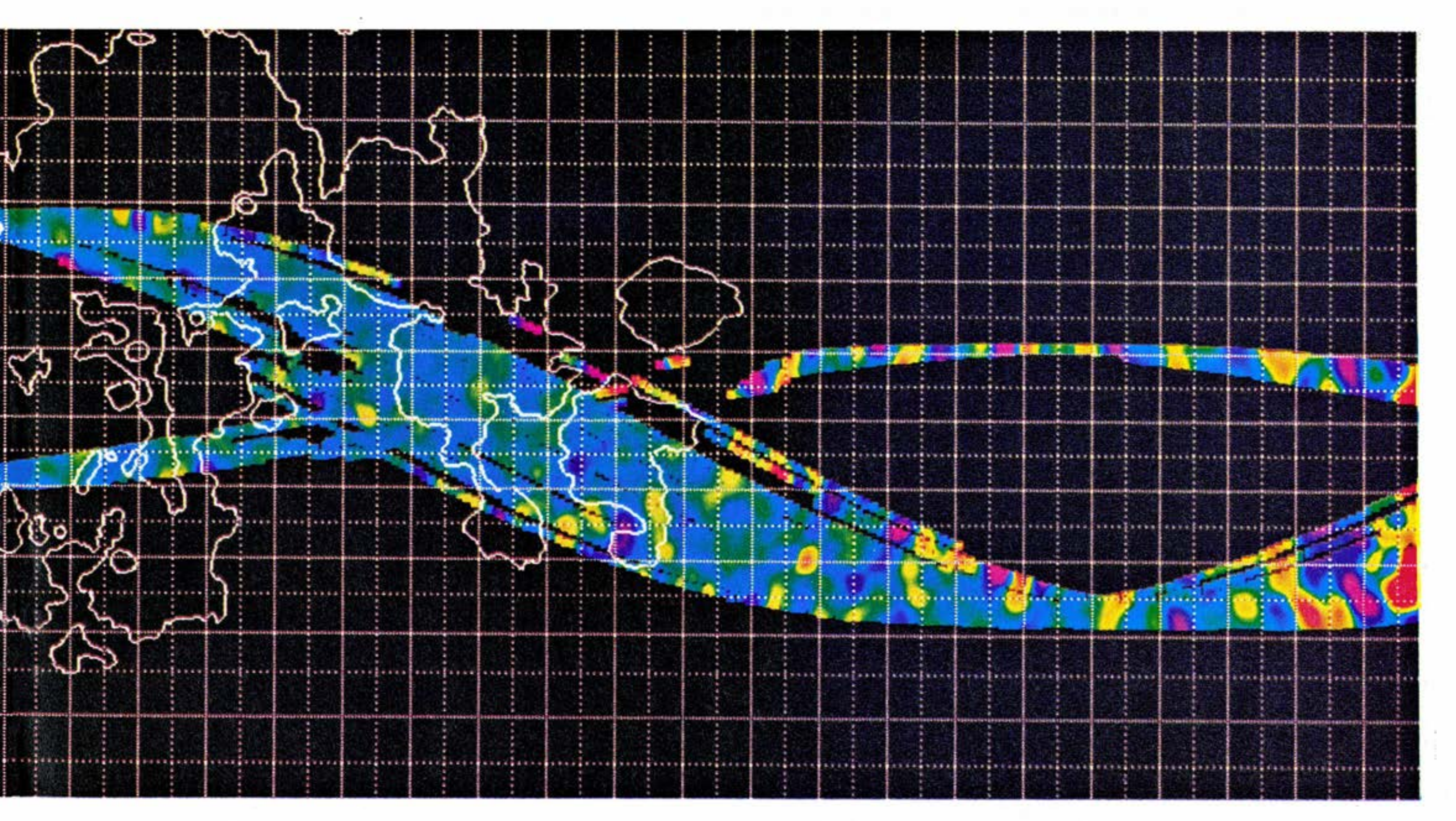
Luna como tal ha girado de suerte que regiones antaño en los polos (donde el eje de rotación corta a la superficie) se hallan ahora próximas al ecuador. Se da el nombre de migración polar a ese proceso porque, desde el punto de vista de la superficie, es la posición de los polos la que parece haber cambiado.

Este resultado, unido al análisis de las formas y posiciones de ciertos grandes cráteres, ha conducido a la hipótesis más atrevida, sin duda: el sistema Tierra-Luna habría comprendido otros cuerpos voluminosos, todos ellos circulando en órbita alrededor de la Luna. A medida que sus órbitas se fueron reduciendo, los objetos se llegaron a romper y dejaron un rosario de impactos en la vecindad de lo que constituía entonces el ecuador lunar. Más aún, sería muy probable que esos impactos provocaran la migración polar.

Estas revolucionarias hipótesis comenzaron humildemente. En 1965, cuando se planearon los experimentos a realizar con las muestras que las misiones Apolo trajeran, nadie se preocupó mucho de las pruebas de magnetización inherente. Se mediría la susceptibilidad magnética entre otras magnitudes, pero con el propósito de aprovechar sus resultados, junto con otros datos petrológicos, para establecer, sobre todo, la composición mineral de las muestras. Pero en 1969 el autor y sus colegas David W. Collinson y Alan Stephenson, de la Universidad de Newcastle upon Tyne, sometieron a prueba la magnetización de algunas muestras, como tantas veces se había hecho con rocas terrestres. Descubrimos que lavas y brechas (estas últimas fragmentos de roca soldados entre sí durante los impactos y sometidas a intenso calor en su proceso de formación) poseían un magnetismo real. En muchos casos, la magnetización pertenecía a una clase que no podía haberse adquirido después de retirar los fragmentos de la Luna, es decir, por haber quedado sometidos al campo magnético de la Tierra o un campo magnético intenso del laboratorio.

En la Tierra las lavas se imantan una vez solidificadas, al enfriarse por debajo de cierta temperatura en presencia del campo magnético terrestre. (La temperatura característica se llama punto de Curie y varía de un material a otro; así, el punto de Curie de la magnetita es de 580 grados Celsius; el del hierro, 780 grados Celsius.) La dirección e intensidad del campo terrestre quedan "congeladas" en la roca, en forma de magnetismo fósil. Igual que un resto fósil incrustado en una roca proporciona información sobre el entorno biológico de la época en que ésta se constituyó, el magnetismo fósil nos ayuda a entender el campo magnético ambiental en la época de formación de la roca. El equipo de Newcastle e investigadores de otros laboratorios (en particular David W. Strangway, de la Universidad de Toronto, y Michael D. Fuller, hoy en la de California en Santa Barbara) llegamos muy pronto a una misma conclusión: las rocas lunares habían adquirido probablemente así su magnetización, es decir, enfriándose por debajo de su temperatura de Curie en presencia de un campo magnético. Pero, ¿cuál era ese campo magnético? La pregunta no tardó en convertirse en una de las cuestiones más obscuras y más acaloradamente debatidas entre los cultivadores de la ciencia lunar.

Los de Newcastle éramos partidarios de resolver la cuestión apelando a la existencia de un pequeño núcleo de hierro, donde podía haberse generado un campo magnético durante el período en el que las lavas emergían hacia la superficie (hace entre 3200 y 3600 millones de años, según la datación ra-



nético en la superficie terrestre). Los colores violeta y púrpura definen regiones donde el campo apunta hacia el centro de la Luna; el púrpura destaca el campo más intenso (de nuevo, unos 0,5 nanotesla). Los accidentes geológicos señalados (*líneas blancas*) corresponden a los mares lunares. El Mare Imbrium se halla en la parte central superior; abajo y a la izquierda distinguimos el Oceanus Procellarum y, en la parte inferior central, el Mare Humorum (*izquierda*) y el Mare Nubium (*centro*). Más hacia la derecha y formando una línea diagonal, se encuentran el Mare Serenitatis (*arriba*), el Mare Tranquillitatis (*centro*) y el Mare Fecunditatis (*abajo*). En el borde derecho de nuestro mapa magnético queda el Mare Crisium. Esta imagen de ordenador fue realizada por Christopher T. Russell, de la Universidad de California en Los Angeles, y Laurence A. Soderblom, adscrito al Servicio de Inspección Geológica de los Estados Unidos.

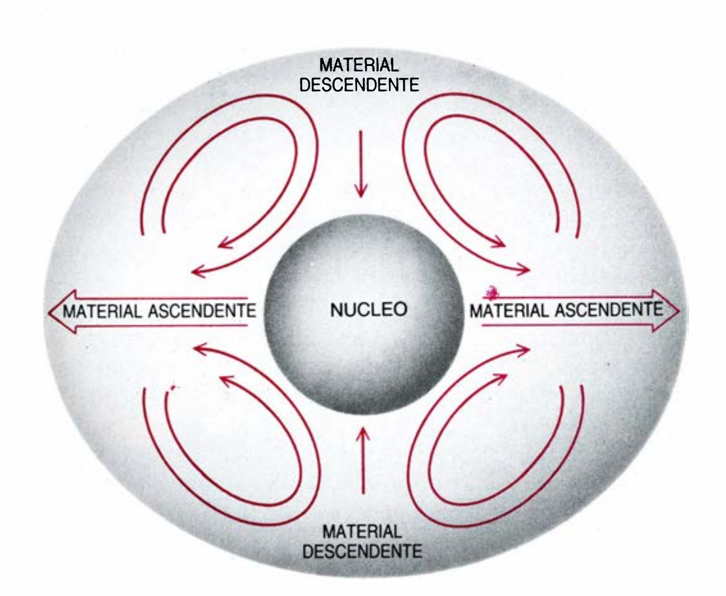
diactiva de las muestras). Para generar un campo, el núcleo debía hallarse entonces fundido. El núcleo fundido habría quedado sometido a convección, movimiento circulatorio en el que las columnas de materia caliente ascienden hasta la superficie de la corteza, donde se enfrían, para hundirse luego y formar una columna más fría y densa. El hierro fundido circulante habría actuado como una dinamo, generando un campo magnético dipolar, muy parecido al actual campo magnético terrestre. Otros planetas (Mercurio, Júpiter, Saturno y Urano) poseen, según se sabe, campos magnéticos que se originan quizás en núcleos fluidos y eléctricamente conductores.

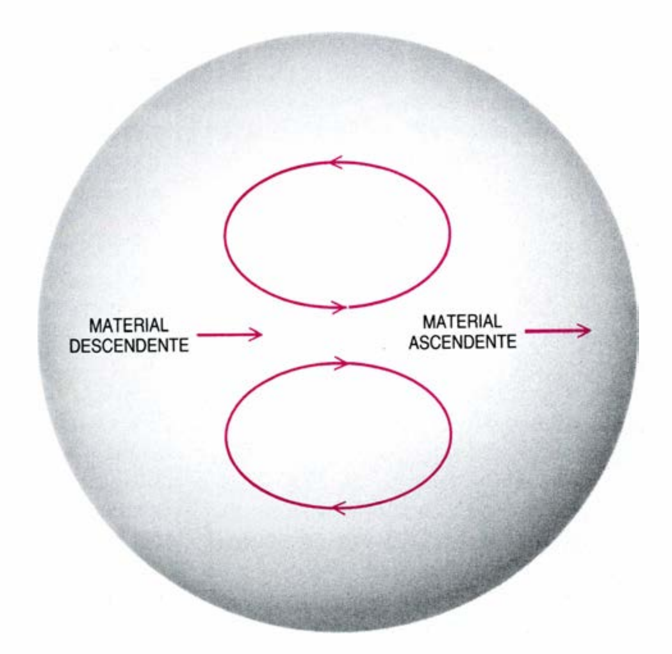
Lo cierto es que la idea de atribuirle a la Luna un núcleo de hierro data ya de 1962, cuando el autor trataba de determinar las modificaciones a introducir en los modelos aceptados del interior de la Tierra, de suerte que incluyeran la teoría de la deriva continental. Se sabía que la Tierra tenía un núcleo de 3500 kilómetros de radio, rodeado por un manto de 2900 kilómetros, constituido por silicatos de hierro y magnesio, y una litosfera, formada también por silicatos, de unos 50 o 100 kilómetros de espesor. Los sismólogos, por análisis de las vibraciones de la Tierra durante los terremotos y después de ellos, habían demostrado que el manto y la litosfera eran sólidos y el núcleo, fluido. Ello no obstante, para explicar el movimiento de las secciones independientes de litosfera que constituyen las placas continentales, hubo que postular que el manto subyacente a las placas podía fluir, transportándolas consigo.

Por fortuna para nosotros, se estaba produciendo por entonces un desarrollo extraordinario en el campo de la física del estado sólido y nos proporcionó un mecanismo mediante el cual pudiera operar el flujo en el manto. El deslizamiento en estado sólido, así se llama el mecanismo, guarda relación con la lenta deformación de un objeto sólido provocada por pequeños esfuerzos que actúan durante largo tiempo. Un ejemplo de este deslizamiento nos lo ofrecen los motores de aviación, en los que los álabes metálicos del compresor y turbina, bajo la influencia de la fuerza centrífuga, se alargan y deforman lentamente —fluyen como una melaza viscosa y pegajosa— a medida que giran. El deslizamiento en estado sólido adquiere importancia a partir de cierta temperatura crítica, que en la Tierra se alcanza en la frontera entre el manto caliente y la litosfera fría.

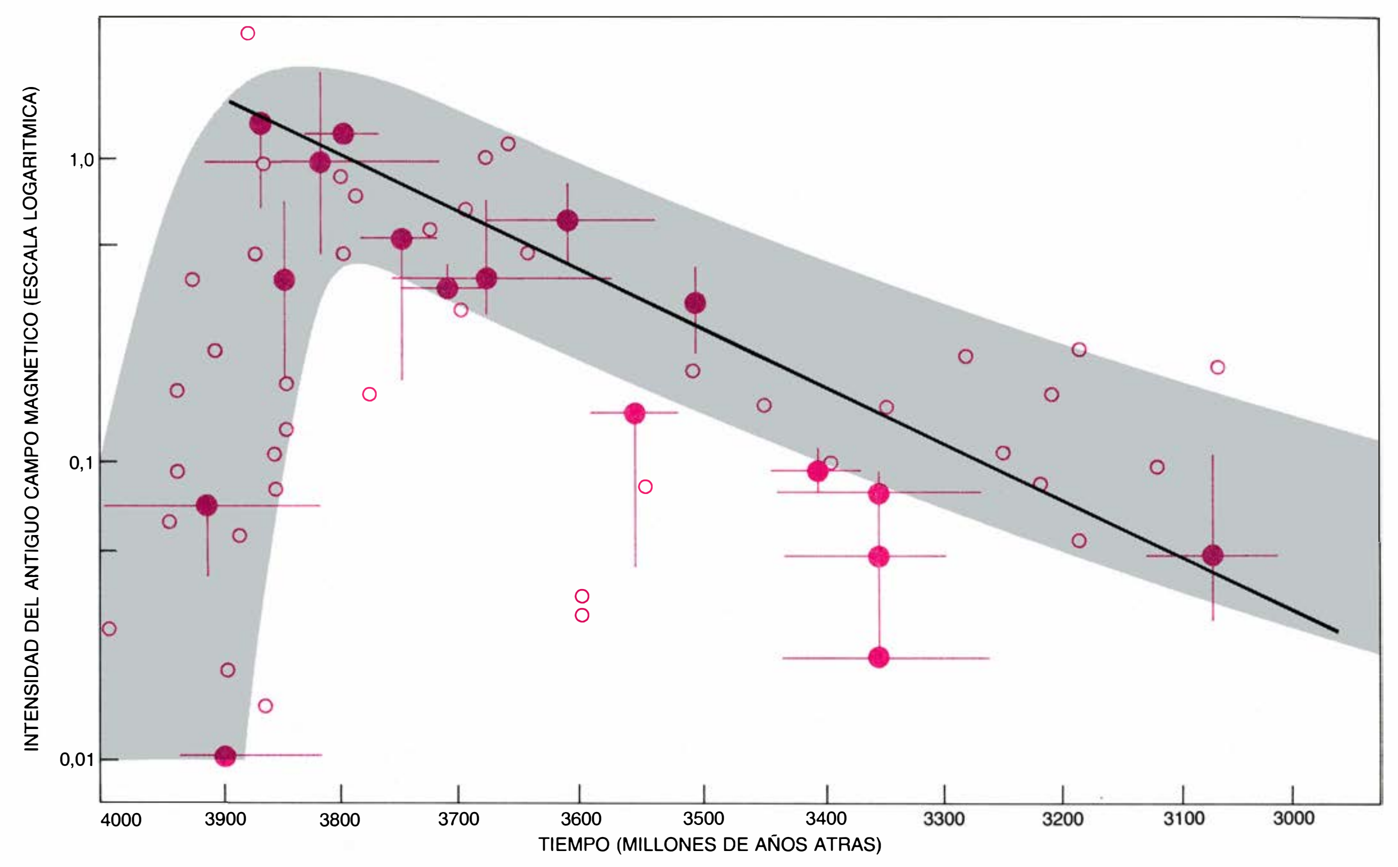
El autor sugirió que la fuerza inductora del deslizamiento en estado sólido del manto terrestre era la convección. En otras palabras, al transportar calor desde la superficie del núcleo hasta la litosfera, el propio manto "sólido" fluía en un movimiento circulatorio de suma lentitud. Esta pausada circulación del manto impulsa, a su vez, los movimientos horizontales de las placas que Alfred Wegener identificó como deriva continental hace 75 años.

El autor sostuvo más tarde que, si la Luna tuviera un núcleo de hierro, un tipo similar de convección en estado sólido podría resolver otro misterio que venía intrigando desde hacía tres siglos y concernía a las fuerzas subyacentes a la geometría de la órbita lunar. En 1693, Jean Dominique Cassini, primer director del Observatorio de París, descubrió un conjunto de tres leyes que describía la rotación de la Luna. De acuerdo con una de esas leyes, la Luna se comportaba, en algunos aspectos, como un giroscopio ligeramente inclinado: su eje de rotación describía una precesión (es decir, se movía en el espacio) a un ritmo regular. Cien años más tarde, Pierre-Simon de Laplace mostró que esta ley sólo era válida si la Luna presentara un gran abombamiento ecuatorial sobre el cual se ejerciese la atracción terrestre, proporcionando el necesario momento giroscópico. Laplace señaló que el abombamiento habría de superar, unas 17 veces, el que aparecería en virtud de la fuerza centrífuga ejercida por la rotación lunar. A lo largo de los últimos cien años, se confirmó la presencia del abombamiento ecuatorial y se midió su tamaño con telescopios que operaban de acuerdo con el principio del estereoscopio.





2. CIRCULACIONES CONVECTIVAS, que ilustran un viejo argumento sobre el que descansaba la tesis que defendía la existencia de un núcleo de hierro en la Luna. Se sabe que nuestro satélite presenta un abombamiento muchas veces mayor que el abombamiento ecuatorial que produciría la fuerza centrífuga ejercida por su rotación. El autor sugirió, en 1962, que el abombamiento lunar obedecería a un proceso de convección bicelular (*izquierda*), circulación en la que la materia caliente se eleva en dos columnas hacia la superficie lunar, donde se enfría, y desciende en dos columnas hacia el centro de la Luna. (La materia en movimiento es el manto sólido de la Luna: la región entre la litosfera, o capa exterior rígida, y el supuesto núcleo; fluye mediante un lento proceso de deslizamiento en estado sólido.) La presión hacia arriba ejercida por las dos columnas calientes crea el abombamiento. Si la Luna no tuviera un denso núcleo, no sería posible el modo bicelular. La convección de una célula —una columna ascendente y otra descendente— podría producirse, pero no el abombamiento.



3. INTENSIDAD del hipotético campo magnético lunar. Según parece disminuyó con el tiempo, que era lo que sucedería en el supuesto de que el campo se hubiera originado por movimientos de un núcleo de hierro fundido, enfriado luego lentamente. Los datos representados (puntos) se basan en la imanación hallada en muestras de rocas lunares cuyas edades se determinaron por calibración radiactiva. Si se admite que las muestras se imanaron por enfriamiento en presencia del campo magnético de la Luna en la época de la formación de ésta, el grado de imanación de cada muestra señalará la intensidad del campo que la magnetizó y, en consecuencia, la intensidad del campo magnético lunar en aquella época. Las circunferencias indican datos basados en métodos bastante imprecisos de determinación de antiguas intensidades; por su parte los círculos remiten a datos basados en métodos de determinación más precisos.

¿Cual fue la causa del abombamiento? Laplace supuso que, al enfriarse la Luna desde su estado de fusión, pudieron desarrollarse varias clases de esfuerzos; y defendió, asimismo, que la forma resultante de éstos se mantuvo tras la solidificación. Más tarde, Sir Harold Jeffreys sugirió que los esfuerzos podría haberlos causado la acción de la marea terrestre. Según esta explicación, el abombamiento tendría que haberse solidificado ya cuando la Luna estaba a un 40 por ciento de su actual distancia de la Tierra.

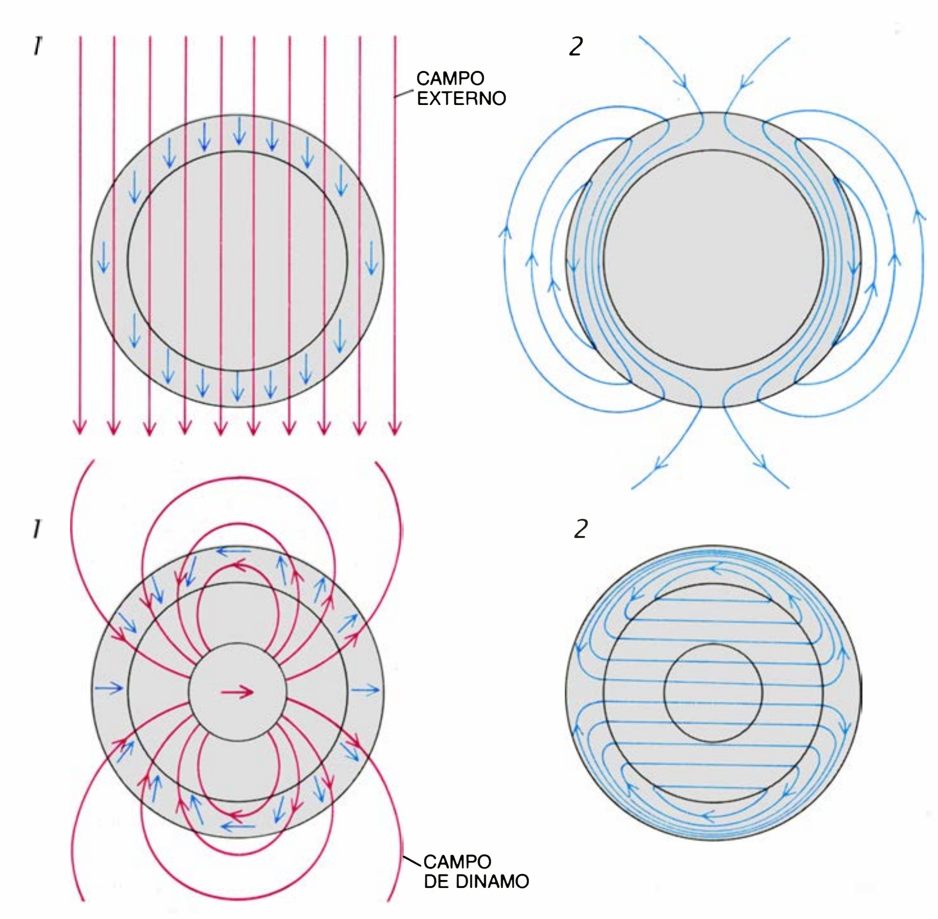
Laplace y Jeffreys suponían que la rigidez de la Luna habría garantizado la persistencia, hasta nuestros días, de una deformación precoz. Ahora bien, si se produjeran en la Luna deslizamientos de estado sólido a razón de una billonésima parte del que ahora sabemos que se produce en materiales de laboratorio a modestas temperaturas, tal abombamiento temprano hubiera desaparecido hace ya mucho tiempo. Por eso me incliné a pensar que el abombamiento persistía, por razones dinámicas, incluso en la actualidad.

Supuse también que el interior de la Luna se hallaba sometido a una lenta convección de estado sólido. En particular, la convección bicelular podría producir la clase de abombamiento requerida. En regiones de elevación de materia, la forma de la Luna se ensancharía hacia afuera, mientras que en zonas de hundimiento la deformación tendría lugar hacia adentro [*véase la figura 2*]. Si la materia que asciende lo hiciera a lo largo del eje Tierra-Luna y la materia en descenso estuviera bajo el borde de la Luna visible desde la Tierra, la configuración resultante —una suerte de balón de rugby con su eje mayor apuntando hacia la Tierra— se asemejaría al abombamiento existente. (Las medidas realizadas por los astronautas del Apolo en agujeros perforados en la Luna mostraron que la temperatura de su interior aumentaba con la profundidad, debido quizás a la desintegración de elementos radiactivos; ello implica que nuestro satélite alberga suficiente calor interno para alimentar la convección.)

Para que acontezca esa convección bicelular en un cuerpo, debe éste tener un núcleo denso que no intervenga en aquélla. En el caso de la Luna, el autor calculó que el núcleo habría de tener un radio de entre 300 y 500 kilómetros. Núcleo que habría de estar formado de materia densa; la materia densa más corriente es el hierro. Basándose en esa y otras razones geofísicas, supuse que el núcleo lunar está constituido por hierro, igual que el terrestre. Al ver las rocas magnetizadas traídas por las naves *Apolo*, pareció razonable admitir que el núcleo de hierro en fusión pudo ser la fuente del primitivo campo magnético lunar que imantó las rocas.

Pero se descubrió que las rocas de muestra eran piezas de lava, arrancadas del suelo rocoso por impactos y esparcidas por la superficie; se ignoraba su orientación original y resultó, pues, imposible determinar en qué dirección se hallaban en el momento de su magnetización y, por tanto, la dirección del campo que las imantó. Lo que no fue óbice para abordar la tarea, incluso más difícil, de determinar la intensidad del campo magnético responsable de tal imanación.

El método para determinar la intensidad del campo original es, en principio, muy sencillo: se magnetiza una muestra en un campo de laboratorio y



4. JUSTIFICACION DE LA OBSERVACION según la cual el campo total debido a las áreas magnetizadas de la corteza lunar no se parece a un campo dipolar (campo como el de una barra imanada). El argumento en que se apoya es muy sencillo. Si la corteza lunar hubiera sido imanada por un campo externo, como el de la Tierra por ejemplo (*arriba, 1*), la corteza habría quedado uniformemente imanada. Después de cesar el campo externo (*arriba, 2*), la corteza crearía un pequeño campo dipolar propio. Si, por otra parte, la corteza hubiera sido imanada por una dinamo interna del núcleo (*abajo, 1*), la dirección e intensidad de la imanación de la corteza variaría de un lugar a otro. Cuando cesara la acción de la dinamo (*abajo, 2*), la imanación de la corteza no engendraría ningún campo magnético dipolar general. El hecho, pues, de que el campo debido a la corteza imanada no sea dipolar apoya la hipótesis de una corteza imanada por una dinamo interna.

se supone que la relación de la intensidad del campo magnético allí aplicado a la magnetización es aproximadamente igual a la relación entre la intensidad del campo lunar original y la magnetización de la roca cuando se cogió de la superficie lunar.

En la práctica, el trabajo presenta, sin embargo, grandes dificultades. Tres son las técnicas generales a emplear. La más sencilla de todas consiste en calentar una muestra por encima del punto de Curie y dejarla enfriar luego en presencia de un campo magnético. Se obtiene así una simulación razonable de las condiciones en las que se produjo la magnetización original, pero la manipulación de la roca puede alterar su naturaleza química.

En una segunda técnica (cuyo desarrollo se debe en buena parte a Stephenson, del laboratorio del autor), menos invasora, se somete la muestra a un intenso campo magnético alternante y a un débil campo magnético permanente. El campo alternante, intenso, agita la estructura magnética de la roca de una manera muy parecida a como lo haría el calentamiento; ello provoca que la roca se muestre sensible a una posible magnetización bajo el débil campo magnético permanente. La magnetización resultante puede compararse entonces con la magnetización original de la muestra para determinar la relación entre el campo magnético débil del laboratorio y el campo lunar original.

En la tercera técnica (desarrollada por Stan Cisowski y Fuller, en Santa Barbara), más respetuosa todavía con la muestra, se aplica un campo magnético de laboratorio extremadamente intenso sin calentar la roca ni aplicar un campo alterno. Se pretende determinar qué proporción de magnetismo se puede inducir en la muestra en condiciones controladas. En cierto sentido, el experimento calibra la roca para así acotar su capacidad natural de magnetización. Se puede estimar, entonces, en qué cuantía la magnetización original de la muestra distaba de su magnetización máxima posible y, a partir de ello, inferir la intensidad del campo magnético original. Esta técnica, que permite analizar múltiples muestras de rocas, no es tan exacta como los otros dos métodos anteriores.

Con estas investigaciones se llegó a unos resultados sorprendentes. El examen de rocas de 3900 millones de años de antigüedad indicaba que el campo magnético de la Luna, en la época en que se formaron las rocas, se cifraba en torno a un gauss, casi el doble del actual campo magnético terrestre en los polos. Además, el campo lunar parece haber decrecido exponencialmente entre hace 3900 y 3200 millones de años, tal como cabía esperar de la hipótesis según la cual las fuentes de calor disponibles para alimentar la acción de dinamo del núcleo se irían atenuando gradualmente a lo largo de ese intervalo. La subsiguiente desaparición del campo era también presumible, pues las fuentes de calor habrían caído, con el tiempo, por debajo del valor crítico necesario para mantener la acción de dinamo o, incluso, para mantener la temperatura del núcleo por encima del punto de fusión del hierro.

Nuestros resultados fueron recibidos con cierto escepticismo, en particular la sugerencia de que la Luna, cuyo núcleo tendría que ser mucho menor que el de la Tierra, engendrara un campo tan intenso. Sin embargo, el acuerdo de los resultados de los tres métodos independientes confiere a la conclusión la seguridad que cabe admitir en toda ciencia histórica: no podemos reproducir con exactitud las condiciones bajo las cuales se formaron y se magnetizaron las rocas lunares; hay que proceder, pues, comprobando si diferentes hipótesis conducen todas a la misma conclusión.

El examen de las muestras traídas no es el único camino para investigar la naturaleza del paleomagnetismo lunar. Los diversos experimentos Apolo y Luna descubrieron muchas manifestaciones de la magnetización actual de las rocas de la corteza. Las misiones experimentales emplearon magnetómetros colocados en la superficie lunar por los astronautas del Apolo o transportados por el tractor soviético *Lunakhod*, y se beneficiaron también de las exploraciones magnéticas realizadas por subsatélites instalados en órbitas lunares de baja altitud (100 kilómetros por encima de la superficie) por los vehículos espaciales norteamericanos *Apollo 15* y *Apollo 16*.

Se observó, entre otras cosas, que las partículas cargadas del viento solar se apartaban a veces de ciertas regiones de la superficie lunar. Las primeras observaciones de ese fenómeno las registró el satélite lunar *Explorer*, que observó desvíos ocasionales de las perturbaciones magnéticas del viento solar hacia la sombra arrojada por la Luna. Mayor interés revistieron observaciones posteriores, realizadas por los vehículos espaciales Apolo, los cuales descubrieron que los electrones de baja energía del viento solar se reflejaban algunas veces en la superficie de la Luna. Ambos efectos se deben a regiones de intensos campos magnéticos, por encima mismo de la superficie de la Luna, causados por anomalías magnéticas cuya presencia denuncia la existencia de estratos de roca de la corteza intensamente magnetizados. Tales observaciones permitieron a Robert P. Lin y Kinsey A. Anderson, de la Universidad de California en Berkeley, cartografiar las intensidades (pero no las direcciones) del campo magnético superficial generado por determinadas regiones de corteza magnetizada.

Para ciertas bandas de la superficie lunar, se pueden construir mapas de la dirección, así como de la intensidad, del campo magnético allí reinante. Trabajando con datos de los magnetómetros del *Apollo 15* y del *Apollo 16*, Paul J. Coleman Jr., Christopher T. Russell y Lonnie L. Hood, de la Universidad de California en Los Angeles, han cartografiado la componente vertical del campo en la corteza, así como las componentes horizontales Norte-Sur y Este-Oeste del campo. Los mapas muestran que la Luna carece hoy de un apreciable campo dipolar (campo análogo al de un imán de barra). No hay dinamo en el interior de la Luna, y el campo magnético total debido a las regiones individuales magnetizadas de la corteza ni siquiera origina el más mínimo campo dipolar sobre la superficie de la Luna.

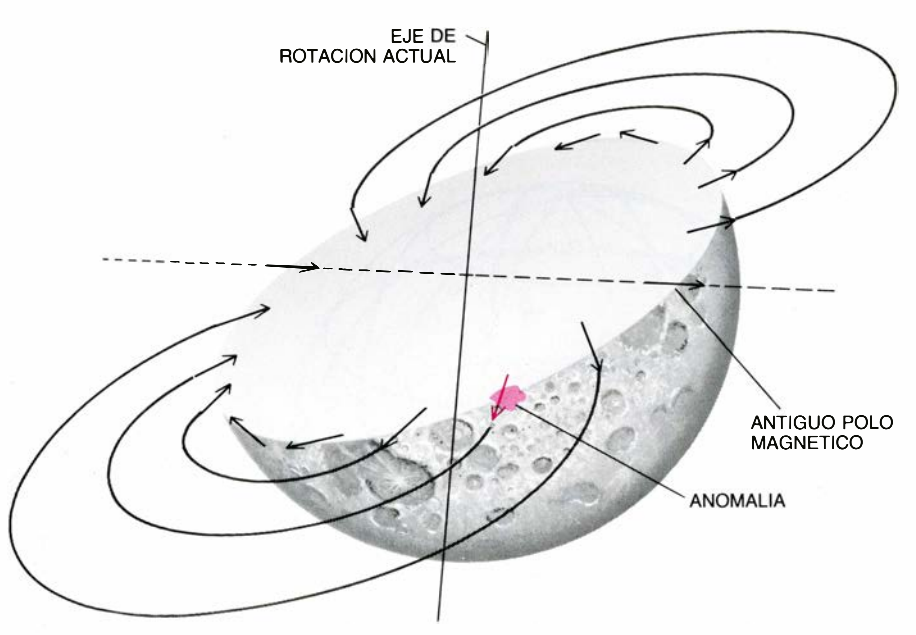
Este resultado refuerza la tesis que defiende la existencia, tiempo atrás, de una dinamo interna. Muchos investigadores, reacios a admitir un campo magnético lunar, han sugerido la idea de la imantación de la corteza al quedar sometida a un intenso campo externo (tal vez el campo terrestre, cuando la Tierra y la Luna estaban más próximas). El autor, sin embargo, demostró mediante un argumento bastante sencillo que tal capa exterior uniformemente imanada tendría un campo global parecido al de un dipolo [*véase la figura 4*]. Por otra parte, mostró también que una corteza que hubiera sido imanada por el campo de una dinamo interna, ya desaparecida, no poseería campo dipolar por encima de su superficie. La Luna encaja en este segundo modelo.

Coleman, Russell y Hood trataron de determinar las formas y posiciones del material magnético responsable de cada anomalía. Comenzaron por suponer que la fuente de cada anomalía era un simple dipolo, pero hallaron que, para producir anomalías cuyas características (piénsese en la intensidad y dirección del campo en cierto número de puntos del espacio) concordaran con las de las anomalías observadas, tales dipolos deberían estar a 50 o 60 kilómetros por debajo de la superficie lunar. A esa profundidad, la temperatura ambiente es mayor que el punto de Curie de los minerales de la corteza, y así los dipolos no permanecerían imanados.

Se demostró, por otro lado, que las anomalías podían también simularse a partir de discos uniformemente imanados de material de la corteza situados en la superficie lunar o en su vecindad. Ajustando las intensidades y direcciones de los campos de esos discos hipotéticos y moviéndose en distintas direcciones sobre una superficie lunar modelada por ordenador, Coleman, Russell y Hood hallaron una buena concordancia con las anomalías registradas. Para que las anomalías produzcan los intensos campos magnéticos observados a alturas de 20 hasta 100 kilómetros, los discos magnetizados han de ser grandes —de hasta 100 kilómetros de diámetro—, y la imanación de cada uno debe tener dirección uniforme sobre una región bastante extensa. Ese modelo no presenta ningún problema si la imanación se debió originariamente a un dipolo lunar. Por otra parte, zonas tan amplias de dirección uniforme del campo magnético eliminarían la hipótesis contraria: la liberación local de energía, piénsese en la producida en impactos de meteoritos, podría haber generado campos transitorios, magnetizando pequeñas regiones de la corteza y creando así las anomalías. (El rayo que magnetiza un saliente rocoso nos ofrece un ejemplo parecido.) Campos locales tan pequeños no concuerdan con los datos de las exploraciones magnéticas.

Para interpretar estos resultados, el autor calculó la posible dirección del campo magnético en el momento de la creación de las anomalías. En otras palabras, trató de hallar la dirección de los polos magnéticos del campo que había magnetizado cada anomalía.

Vio que las anomalías pertenecían a tres grupos. Dentro de cada uno, los polos (magnéticos) caían en dos agrupaciones antípodas. Cada par de agrupaciones definía así un eje de la Luna. El eje definido por cada grupo apuntaba en una dirección muy diferente de los ejes definidos por los otros dos grupos y de la dirección del actual eje de rotación de la Luna; ésta parece haber contado con tres conjuntos distintos de



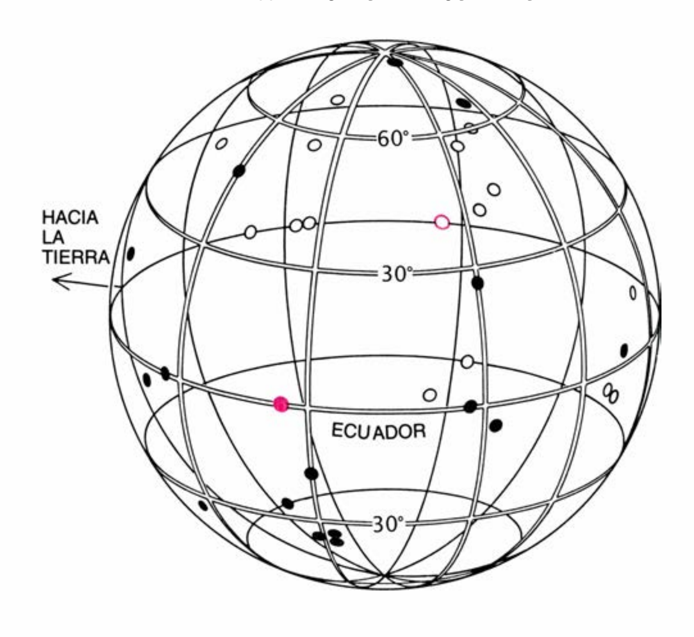
5. ORIENTACION del antiguo campo magnético lunar. Se infiere de la imanación de una anomalía magnética (una región magnetizada de la corteza). Si conocemos la dirección de la imanación de la anomalía (*color*) y admitimos que la anomalía recibió la imantación de un campo dipolar, se puede reconstruir el campo existente cuando la anomalía se magnetizó (*líneas negras*) y determinar dónde estaban los polos magnéticos.

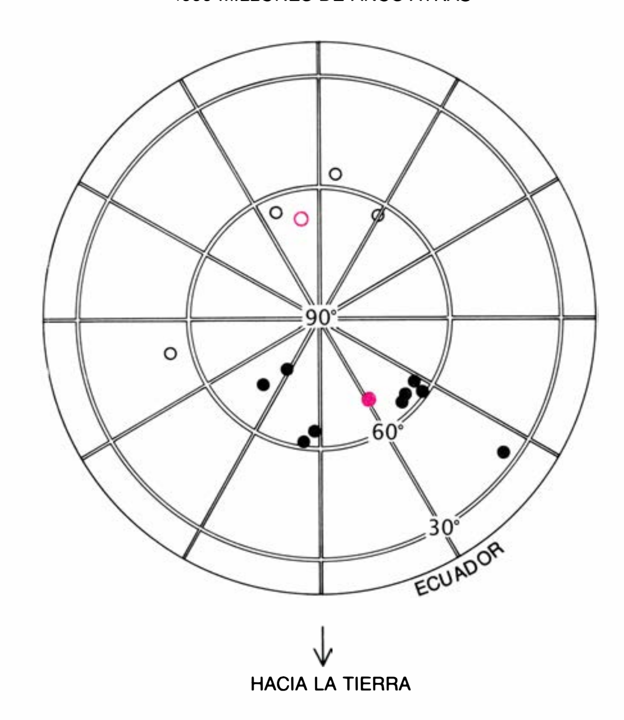
polos magnéticos. La razón por la que los antiguos polos norte se encuentran en ambos extremos de cada eje estriba, probablemente, en que el campo lunar cambió su polaridad sin modificar la orientación de su eje, fenómeno éste que se ha producido cientos de veces en la Tierra. Pero, ¿cómo explicar los tres ejes independientes?

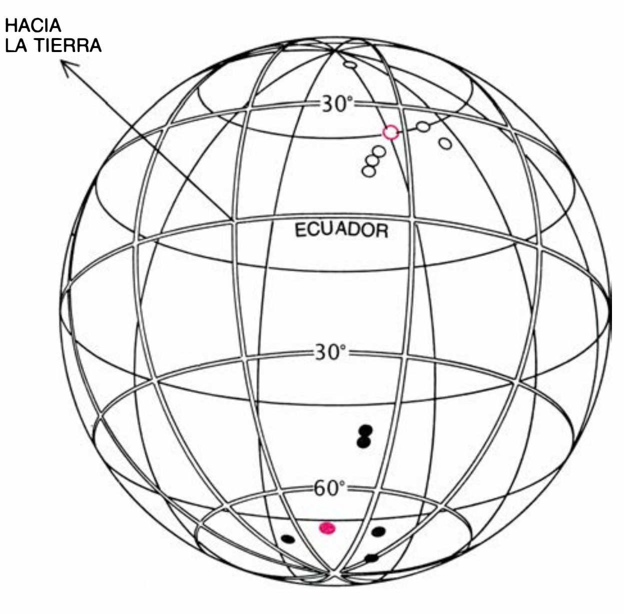
Las edades de las anomalías nos abren un camino. Pero resulta difícil establecer en qué época se imanó cada una, toda vez que las anomalías suelen darse en regiones de las que no se han recogido muestras; podemos, sin embargo, estimar su edad aproximada a partir de la cartografía geológica de la Luna (tarea que, en gran parte, ha corrido a cargo de Don E. Wilhelms, del Servicio de Inspección Geológica de los Estados Unidos). De acuerdo con esos análisis, las anomalías registradas en el interior de cada grupo se formaron por la misma época aproximada, si bien los tres grupos de anomalías magnéticas surgieron en momentos diferentes de la historia lunar. La época más antigua se remonta unos 4200 millones de años, la intermedia unos 4000 millones de años y, la más reciente, unos 3850 millones de años.

Así, el eje del campo magnético de la Luna apuntaba en direcciones distintas en épocas diferentes. Si se supone que el eje del campo magnético lunar guardó siempre la dirección aproximada del eje de rotación del satélite (hipótesis justificada por el papel predominante de la fuerza de Coriolis —fuerza complicada, debida al giro de la Tierra— en la magnetohidrodinámica del núcleo terrestre), se concluye que, en diferentes épocas, el eje de rotación de la Luna debe haber apuntado en direcciones distintas con respecto a la superficie. ¿Cómo es posible esto?

La respuesta, la migración polar, es una vieja noción que arranca de las postrimerías del siglo XIX, para explicar cómo partes de la India, Australia y Africa, que se hallan ahora cerca del







6. POLOS NORTE ANTIGUOS del campo magnético lunar, deducidos de las anomalías. Caen dentro de tres grupos. Se infirió la posición de cada polo a partir de una anomalía. Dentro de cada grupo, las anomalías de las que se dedujeron las posiciones del polo vienen a ser de la misma edad; el grupo más antiguo corresponde a unos 4200 millones de años atrás, el intermedio a unos 4000 millones de años y, el más moderno, a unos 3850 millones de años. En cada grupo (en los dos más jóvenes sobre todo), el eje del campo magnético obtenido es aproximadamente el mismo para cada anomalía, pero en algunos casos el polo Norte se halla en un extremo del eje y en otros cae en su antípoda. (Las circunferencias representan aquí puntos en el lado opuesto de la Luna, tal como aparece en la página; los círculos, puntos en la cara próxima; las circunferencias de color, la posición media de la proyección de los polos sobre la cara oculta, y, los círculos de color, la posición media de la proyección de los polos en la cara próxima.) El campo magnético parece haber invertido su polaridad en varias ocasiones.

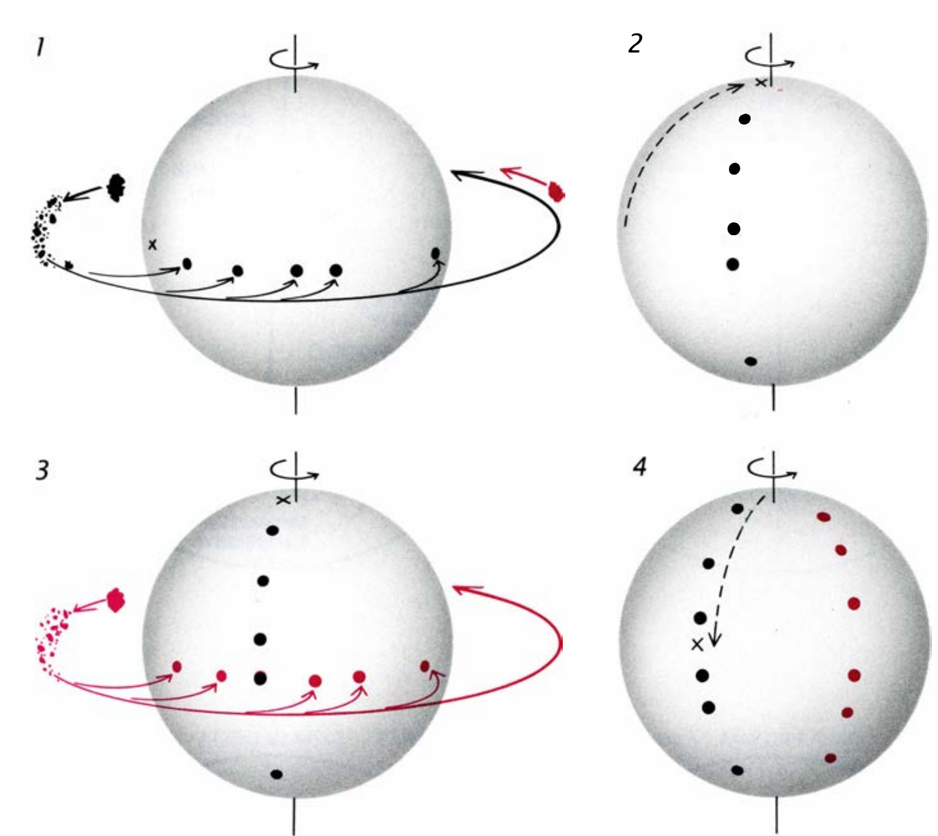
ecuador terrestre, pudieron experimentar glaciaciones hace 200 millones de años. En el análisis de la historia de la Tierra, la hipótesis de la migración polar se ha sustituido en gran parte por la teoría de la deriva de los continentes.

La migración polar se basa en principios fundamentales de la física de los cuerpos en rotación. Cómo mostró Leonhard Euler, los cuerpos giran en forma más estable cuando la máxima cantidad de masa posible queda lejos del eje de rotación. (La idea se comprende intuitivamente: cuando un cuerpo está en rotación, la fuerza centrífuga tiende a alejar del eje de rotación las partes del cuerpo con mayor masa.) Si un cuerpo se halla en rotación estable y se altera de forma brusca su distribución de masa, tenderá a balancearse y realinearse hasta que, de nuevo, gire con la máxima cantidad de masa alejada del eje de rotación.

Según la ley de conservación del momento cinético, no pueden cambiar ni la posición ni la orientación en el espacio del propio eje de rotación. Antes bien, es el cuerpo mismo el que se reorienta, de suerte que el eje de rotación pasa por una parte distinta del cuerpo. Se podría, pues, afirmar que es la superficie la que emigra en relación con el polo (punto del espacio donde el eje de rotación corta la superficie). Regiones que habían estado en las cercanías de los polos se mueven hacia el ecuador, y regiones próximas al ecuador avanzan hacia los polos. De haber ocurrido la migración polar en la Luna, los polos magnéticos habrían estado en diferentes posiciones de la superficie en distintas épocas y el eje magnético hubiera conocido diferentes orientaciones con relación al satélite entero.

¿Qué es lo que pudo haber causado la migración polar en la Luna? La respuesta a esta pregunta conduce a algunas de las más apasionantes posibilidades suscitadas por la investigación del autor. Cuando éste representó la posición donde habría estado el ecuador lunar en cada una de las tres épocas durante las cuales se formaron las anomalías magnéticas, observó que muchos de los grandes cráteres de impacto producidos en cada período se hallaban cerca de lo que entonces constituía el ecuador lunar. Dato que permitió, a su vez, dos descubrimientos importantes.

Sugiere, en primer lugar, que la Luna se reorientó al menos tres veces después de que los planetésimos (corpúsculos originarios del sistema solar) hubieran chocado con ella cerca del ecuador. Cada impacto habría creado una cuenca —región de baja masa— cerca del ecuador y lejos del eje de rotación. Pero se trataba de una configuración inestable. La Luna se habría entonces reorientado de manera que las regiones de mayor masa quedaran cerca del ecuador y, las cuencas, próximas a los polos. Esto parece ser, en realidad, lo que ocurrió cada vez [*véase la figura 8*]. La ilustración simplifica un tanto lo acontecido; las cuencas dibujadas cerca de cada paleoecuador señalan que, durante cada periodo, se produjeron una serie de impactos separados entre sí por intervalos temporales bastante cortos.

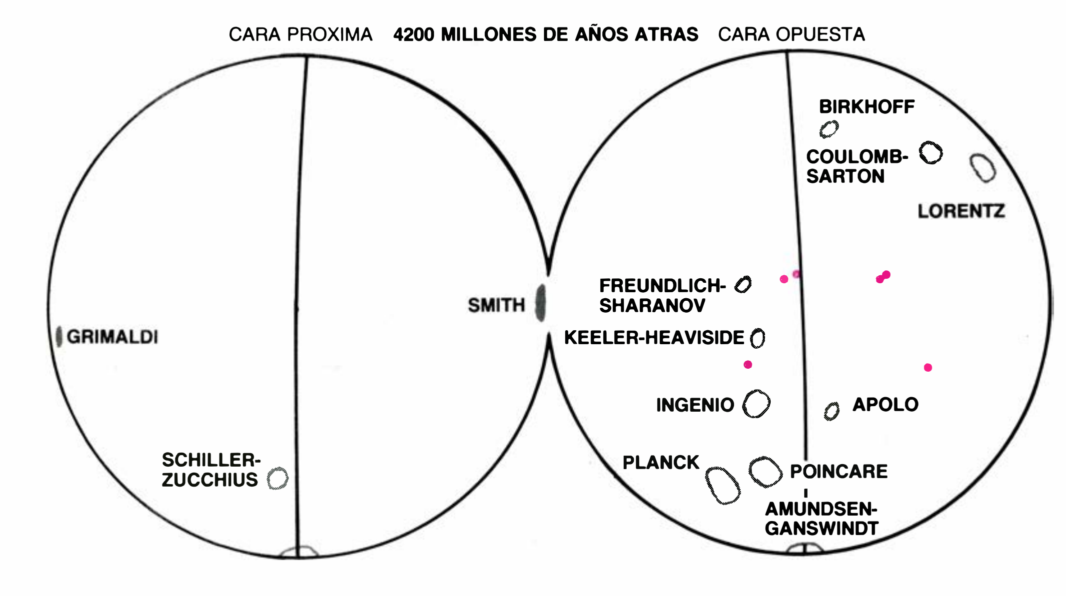


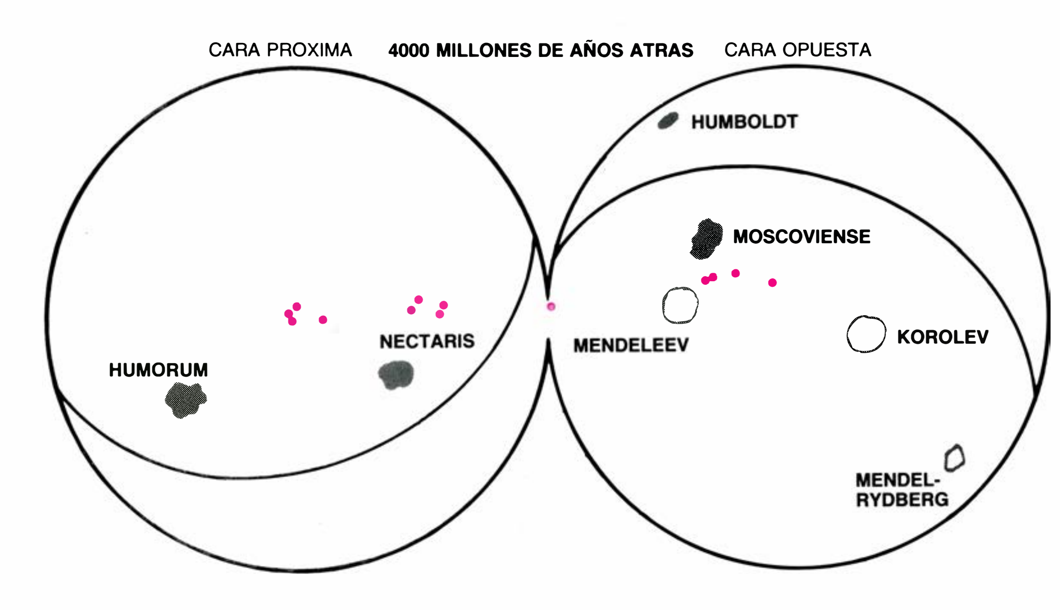
7. HIPOTETICA HISTORIA DE LA LUNA, según se infiere de las posiciones de los paleopolos magnéticos y de las posiciones, formas y edades de grandes cráteres de impacto. De acuerdo con este modelo, había en un comienzo varios satélites que describían órbitas en torno a la Luna. Uno de los satélites, atraído por las fuerzas de marea lunar, se rompió en fragmentos, que fueron precipitándose contra la superficie lunar a lo largo de breves intervalos de tiempo (*1*), dejando un rastro de cuencas de impacto cerca del ecuador. La consiguiente redistribución de masa en la superficie de la Luna hizo que ésta alterase su orientación con respecto a su propio eje de rotación; y así, muchas cuencas quedaron lejos del ecuador (*2*). Otro satélite lunar, atraído a su vez y fragmentado (*3*), dejó su propio rosario de depresiones cerca del nuevo ecuador; la Luna se reorientó de nuevo (*4*). Resulta verosímil una tercera secuencia análoga de acontecimientos.

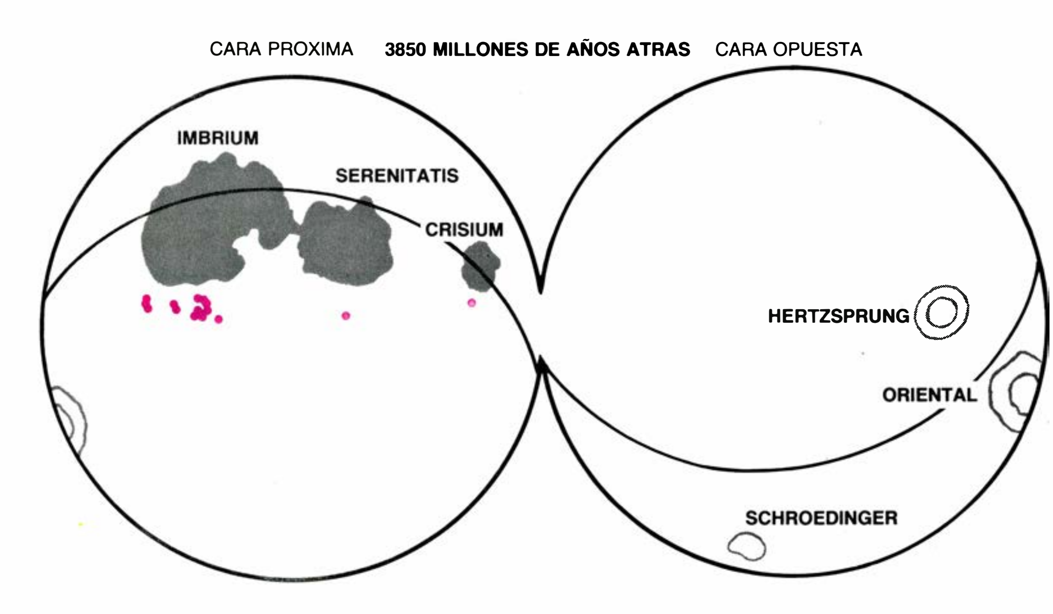
En segundo lugar, el hecho de que los planetésimos chocaran con la Luna cerca del ecuador sugiere que no eran asteroides o cometas en órbita alrededor del Sol, pues éstos habrían dado contra cualquier punto de la superficie lunar. Hubo de tratarse, en cambio, de satélites de la propia Luna, en órbita alrededor del plano ecuatorial de ésta. (Igual que los satélites de Marte, Júpiter, Saturno y Urano describen órbitas en torno a sus respectivos planetas casi en el plano ecuatorial de éstos.)

Los satélites en cuestión habríanse visto gradualmente atraídos hacia la Luna por la acción de marea de ésta (como Phobos se siente hoy atraído hacia Marte). El autor sospecha que hubo, al menos, tres satélites. A medida que la Luna iba atrayendo el primer satélite, las fuerzas de marea lo romperían en pedazos. Sus fragmentos caerían sobre la Luna, a distintos intervalos de tiempo, muy breves, dejando un rastro de cráteres de impacto y provocando la reorientación lunar. Unos 200 millones de años más tarde, las fuerzas de marea habrían desintegrado el segundo satélite, y así sucesivamente.

El análisis de la morfología de los cráteres de impacto refuerza esta hipótesis. Los satélites fragmentados se habrían acercado a la superficie lunar según un ángulo muy pequeño, a medida que sus órbitas se iban contrayendo poco a poco. Donald E. Gault, del Centro de Investigación Ames de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), realizó experimentos sobre impactos a alta velocidad; demuestran sus resultados







que, a ángulos de incidencia inferiores a unos cinco grados, los restos de un impacto tienden a salir disparados hacia fuera formando una suerte de mariposa y la cuenca de impacto tiende a adquirir una configuración elíptica. Esas depresiones aparecen con toda nitidez en fotografías de grandes cráteres de la Luna. Además, los ejes mayores de estas cuencas elípticas corren casi paralelos a la línea del ecuador correspondiente al período en que se formaron los cráteres, lo que prueba que los objetos incidentes se movían en el plano ecuatorial lunar, o cerca del mismo, en el momento de la colisión.

El autor llega, por tanto, a la conclusión de que la Luna tuvo un sistema de satélites en los albores de su historia. Ese dato relativo a la existencia de otros cuerpos en el sistema Tierra-Luna habrá de suministrarnos valiosa información sobre el origen de dicho sistema y el de los planetas en general.

Los investigadores tienen una idea razonablemente clara de la primitiva evolución del sistema solar: una nube de gas interestelar y polvo se contrajo desde un diámetro de unas 100.000 unidades astronómicas (una unidad astronómica es la distancia media de la Tierra al Sol, unos 150 millones de kilómetros) hasta un diámetro de unas 50 unidades astronómicas, aplastándose en una suerte de disco a medida que iba contrayéndose. Sin embargo, nuestro conocimiento de las fases siguientes es bastante somero. Los pequeños granos de silicatos y hierro debieron aglomerarse y formar millones de cuerpos pequeños, los cuales, a su vez, se reunirían para constituir cuerpos mayores. Las fases finales de esta aglomeración se reflejan en los muchos cráteres de impacto que salpican las superficies de la Luna y Mercurio, pero apenas si hay indicios referentes a las primeras fases del proceso de aglomeración. La hipotética existencia de satélites bastante grandes, en el primitivo sistema Tierra-Luna, podría permitir la reconstrucción de esta fase intermedia de la formación del sistema solar.

8. ANTIGUOS ECUADORES de la Luna definidos sobre imágenes que ilustran su orientación actual. Las líneas negras continuas representan el ecuador lunar en cada una de las tres épocas consideradas. Los puntos muestran la posición de las anomalías magnéticas cuyas direcciones de imanación condujeron a determinar las posiciones de los paleopolos, a partir de las cuales se dedujeron las de estos antiguos ecuadores. Las cuencas importantes, señaladas por su nombre, pudieron producirse por el impacto de fragmentos de satélites que, hace mucho tiempo, describían órbitas en torno a la Luna.

Movimiento de las células animales

Avanzan introduciendo parte de la membrana en el citoplasma y reciclándola a la superficie de modo controlado. Los nutrientes se incorporan en el interior celular por el mismo procedimiento

Mark S. Bretscher

El movimiento es una propiedad fundamental de los seres vivos. En efecto, junto con actividades tales como la respiración y la reproducción, la locomoción es una de las cualidades que distingue a los organismos de los objetos inanimados. A un animal, sano o enfermo, la capacidad de movimiento de sus células puede resultarle crucial. Los glóbulos blancos deben moverse por el cuerpo para combatir a los patógenos; ante la abertura de una herida, los fibroblastos migran a ella para participar en su curación. El movimiento celular puede también tener efectos mortales; en ocasiones, de los tumores se desprenden células cancerosas, que viajan a otras partes del cuerpo y fundan nuevos tumores en un proceso de metástasis. La locomoción celular desempeña, por tanto, un papel fundamental en la vida y, a veces, en la muerte. Hasta hace poco se desconocían los pormenores del movimiento real de las células animales.

Sin embargo, durante la pasada década los investigadores han aprendido mucho acerca de los procesos en los que se basa la locomoción. Describiremos aquí cómo la célula animal en movimiento introduce parte de su membrana externa en el interior celular y la devuelve, más tarde, a la superficie en lo que constituye el denominado ciclo endocítico. Cumple éste una doble función: lleva moléculas de nutrientes al interior celular y es esencial para la locomoción de la célula. Destacaremos dos aspectos relativos a la locomoción. El ciclo proporciona un mecanismo por el que la célula puede extenderse hacia delante; quizá genere también la fuerza motriz que impulsa su avance. No se ha comprobado aún que proporcione esa fuerza, pero demostraré aquí que esos dos aspectos de la locomoción resultan inseparables.

Excepto las espermáticas, se cree que todas las células animales se mueven en virtud del mismo mecanismo. Las células seminales poseen un flagelo activo que funciona cual cola de anguila y posibilita al esperma la "natación" hacia delante. El resto de las células animales no nadan en un medio líquido, sino que "se arrastran" sobre un sustrato; esa gran mayoría de células reptantes constituyen el sujeto de este artículo. En particular me centraré en las células fibroblásticas que migran a la herida y más tarde ayudan a cicatrizarla. De todas las células móviles de mamífero, han sido los fibroblastos las que más se han estudiado, debido, sobre todo, a que se desarrollan con facilidad en cultivos de laboratorio.

En cultivo, los fibroblastos suelen ser inmóviles, pero empiezan a moverse si se acumulan. Vistos desde arriba, los fibroblastos en movimiento aparecen, a menudo, en forma triangular: un lado del triángulo constituye el frente, o borde anterior, y la célula va reduciéndose progresivamente hasta un estrecho borde posterior. En la escala macroscópica, los fibroblastos se mueven lentamente —un centímetro diario—; su avance se observa mejor por fotografía secuencial. Se advierte entonces que el borde anterior es mucho más activo que el resto de la célula. Sin embargo, su actividad no sigue un modelo predecible: extiende brevemente una zona del borde anterior sobre el sustrato; luego, cuando la actividad remite, quizás extienda otra. La secuencia se repite hasta que la célula ha avanzado a lo largo de todo el frente.

A veces, si la nueva extensión del borde anterior no se ha anclado al sustrato con suficiente firmeza, se pierde el avance irregular de la célula. Cuando ello sucede, el segmento suelto se levanta y se riza sobre la célula; con el tiempo, esa prolongación se resorbe y termina por desaparecer en el cuerpo celular: una nueva extensión ocupa su lugar. Por ese desordenado ajetreo de prolongaciones y levantamientos, el borde anterior del fibroblasto se denomina a menudo borde rugoso. Tales irregularidades sólo se dan sobre algunos sustratos; sobre otros, el borde anterior se une tan eficazmente que no se produce arrugamiento y la célula se desliza en un suave avance.

Muchos años de observación de fibroblastos han permitido concluir a los biólogos que, durante el movimiento celular, la acción se localiza en el borde anterior. Un conjunto de experimentos, iniciados en 1970, han confirmado que el borde anterior constituye, en efecto, el sitio de una parte decisiva de la acción. Esos ensayos han ayudado también a demostrar que los fenómenos que se registran en el borde anterior están engarzados en otro proceso que transcurre por toda la célula.

En 1970, Michael Abercrombie, Joan E. M. Heaysman y Susan M. Pegrum, a la sazón en la Universidad de Londres, realizaron un experimento decisivo, en el que observaron qué sucedía cuando un fibroblasto en movimiento topaba con pedazos microscópicos de carbón dispersos por el sustrato. A veces, la célula se limitaba a deslizarse sobre el carbón. En otras, sin embargo, la partícula quedaba adherida a la superficie superior del borde anterior. Cuando eso ocurría, la partícula se movía hacia atrás sobre la superficie celular según avanzaba la célula hacia adelante. El movimiento de la partícula seguía más o menos una línea recta y finalmente el puntito negro se detenía cerca del borde posterior.

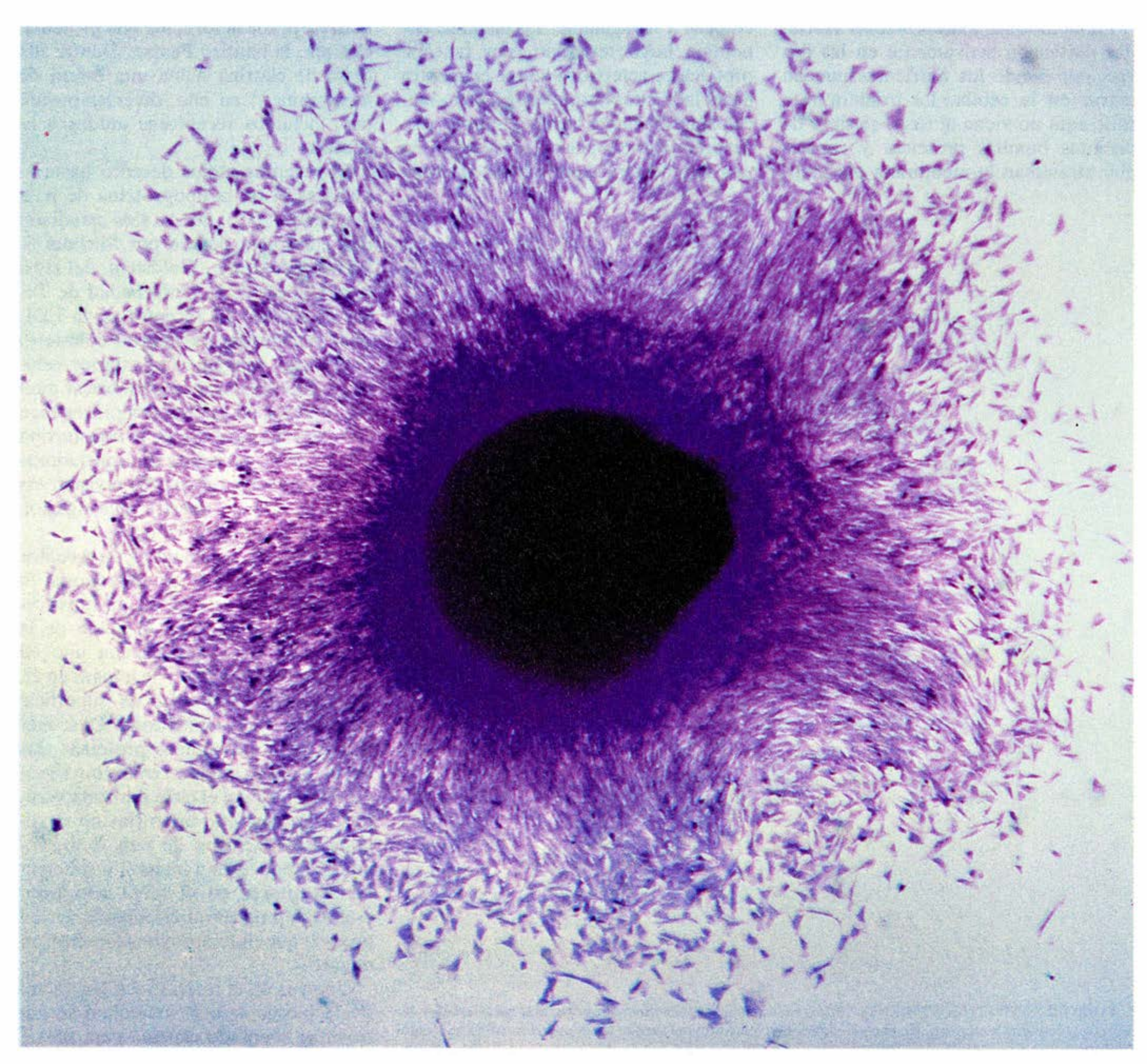
Abercrombie y sus colegas propusie-

ron una explicación esclarecedora de esos interesantes resultados. Sugirieron que, puesto que la partícula se movía hacia atrás y estaba unida a la membrana plasmática (exterior) de la célula, esa membrana debía también presentar un movimiento hacia atrás: debía darse un flujo continuo de la membrana desde el borde anterior de la célula hacia su borde trasero. Para explicar el flujo, el grupo de Abercrombie propuso que el material de la membrana se resorbía en la parte posterior de la célula y se transfería luego a la frontal a través de la célula, donde se reinsertaría en la membrana plasmática. Consideraron que tal ciclo de transferencia de membrana permitiría que la célula, por sí misma, se extendiera hacia delante sobre el sustrato.

El ciclo propuesto por Abercrombie evoca el mecanismo de propulsión de un carro de combate. En su modelo, la membrana plasmática constituye una hoja flexible, continua y análoga a la cadena del carro. La membrana que cubre la superficie inferior de la célula, adyacente al sustrato, correspondería a la cadena inferior, en contacto con el terreno y cuyo movimiento es en sentido opuesto al del carro de combate. El transporte intracelular de la membrana, desde la parte posterior de la célula hacia el frente, correspondería a la cadena superior del carro.

Experimentos realizados en numerosos laboratorios han demostrado que el modelo de Abercrombie es correcto en líneas generales, pero desde su formulación se han realizado importantes avances en el conocimiento de la estructura de las membranas celulares y del proceso por el que la membrana se recicla en la célula [véase "Moléculas de la membrana celular", por Mark S. Bretscher; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 1985]. Tales avances han confirmado al mismo tiempo el modelo global de Abercrombie y han demostrado en qué fallaba.

La base de todas las membranas celulares es una doble capa de moléculas lipídicas (grasas). En esa matriz

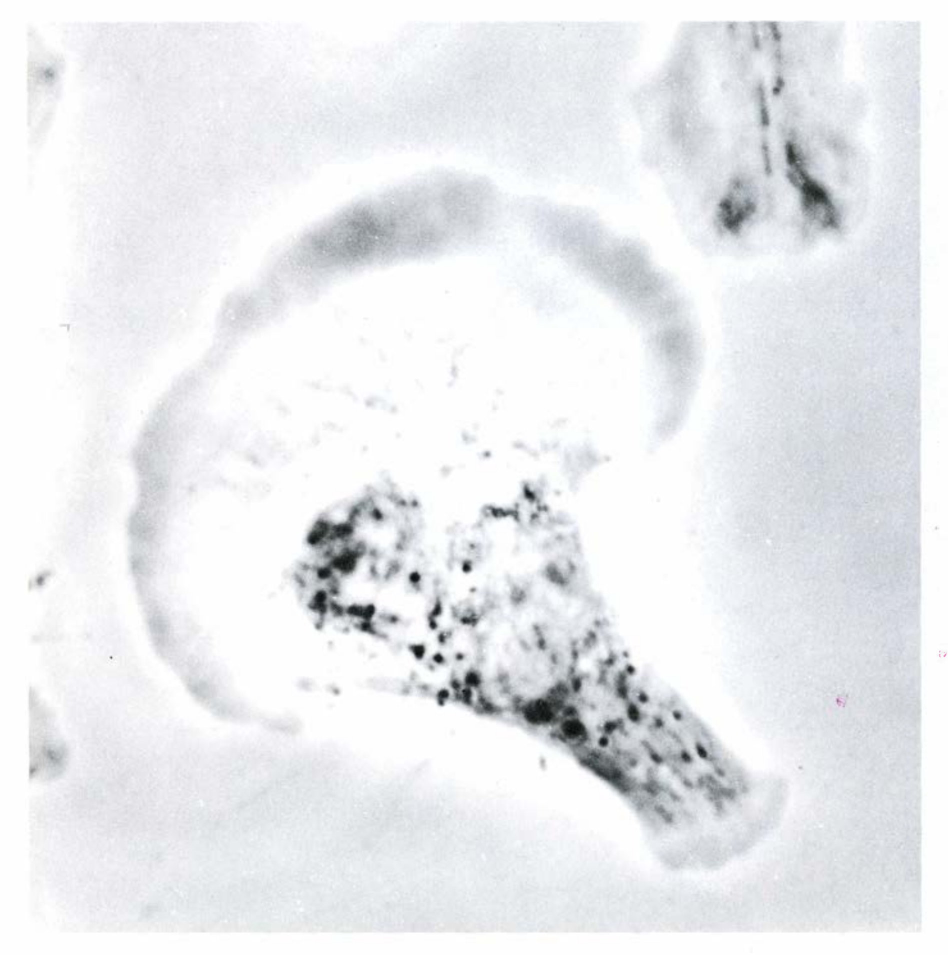


1. FIBROBLASTOS APARTANDOSE de un pedazo de tejido embrionario de corazón de pollo colocado sobre una placa de cristal. Según se cree, muchas células animales están capacitadas para moverse, pero no todas utilizan esa facultad; los fibroblastos, que participan en la curación de heridas, pertenecen a la reducida clase de células que necesitan moverse para desempeñar sus funciones. Micrografía de Peter A. Lawrence, del Consejo de Investigaciones Médicas.

de bicapa lipídica se insieren múltiples proteínas, que desempeñan diversas funciones. Una propiedad clave de la bicapa es que, aunque constituye una estructura planar estable, dentro del plano es un líquido: los lípidos y las proteínas pueden difundirse lateralmente con libertad en cualquier dirección. La distancia recorrida por una molécula depende de la raíz cuadrada del tiempo durante el que se mueve y de su tamaño y forma. Al ser menores, los lípidos se mueven más deprisa que las proteínas. Una proteína típica puede avanzar 10 micrometros (millonésimas de metro) en un minuto. Puesto que la longitud de los fibroblastos es de alrededor de 50 micrometros, una proteína promedio se difundirá de un extremo al otro en media hora.

La membrana y sus proteínas asociadas participan activamente en las dos vías por donde los nutrientes pueden entrar en la célula. La primera ruta (que aquí no viene al caso) se sirve de distintas bombas proteicas y canales que atraviesan la membrana plasmática. Tales bombas y canales transportan moléculas pequeñas hasta el citoplasma, por ejemplo, aminoácidos, azúcares e iones inorgánicos. La segunda ruta, empleada por moléculas demasiado grandes para que las lleven al interior celular proteínas transportadoras, utiliza la endocitosis.

Se inicia el proceso endocítico cuando una molécula de nutriente se une a un receptor específico situado en la superficie celular. El receptor es una proteína de membrana; el nutriente al que se une se denomina ligando. Un fibroblasto porta alrededor de 50 tipos diferentes de receptores, cada uno de los cuales acepta una sola clase de ligando. Tras la unión de los ligandos a sus receptores, se encierran —unos 1000 a la vez— en el lugar donde la membrana empezó a invaginarse. La mella se denomina hoyo revestido, por la capa proteica característica que se encuentra en su lado citoplasmático. El hoyo crece paulatinamente hacia el interior y se desprende al citoplasma convertido en una microesfera membranosa, la vesícula revestida, que acerrea los ligandos al interior celular.



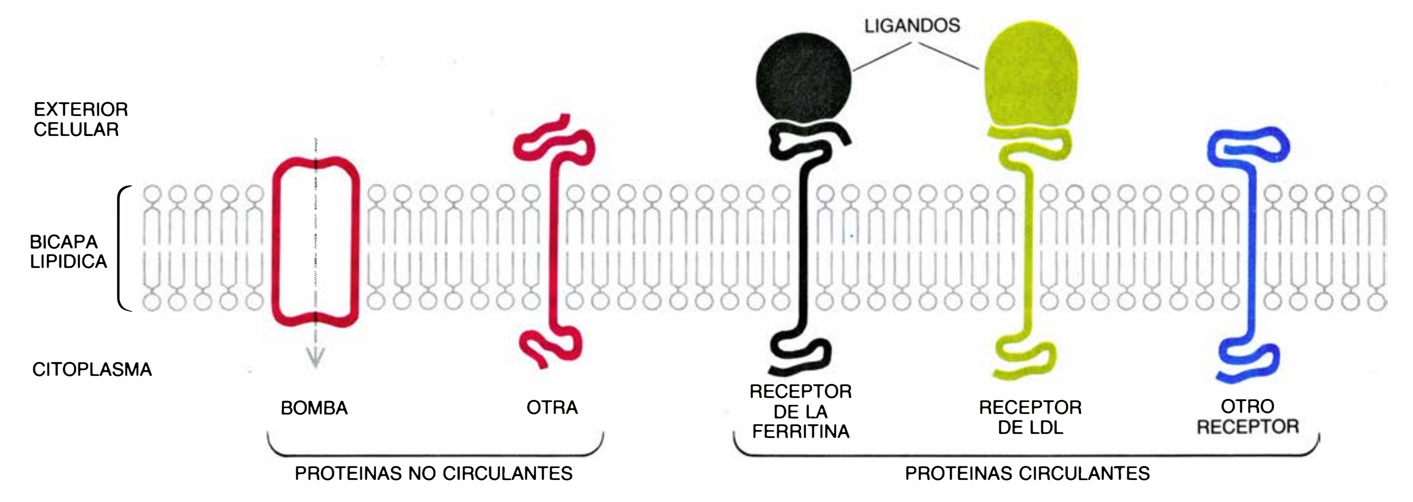
2. FIBROBLASTO EN MOVIMIENTO. Muestra la forma aproximadamente triangular característica de esas células cuando se mueven. El margen convexo gris constituye el amplio borde anterior, o frente. Desde el frente, la célula va reduciéndose hasta un estrecho borde posterior, que avanza a remolque. El fibroblasto, aumentado en esta fotografía alrededor de 2000 diámetros, "se arrastra" hacia adelante: extiende sucesivamente diversas partes del borde anterior. La marcha es lenta: la célula cubre sólo un centímetro diario.

En los últimos años se ha avanzado mucho en el conocimiento de los hoyos revestidos, las vesículas revestidas y los receptores que transportan; las implicaciones de esos nuevos datos recabados por varios grupos de investigadores no se restringen al movimiento celular. Los hoyos y vesículas revestidos fueron descubiertos en 1964 por Thomas F. Roth y Keith R. Porter, de la Universidad de Harvard. En 1975, Barbara M. F. Pearse, del Laboratorio de Biología Molecular del Consejo de Investigaciones Médicas, de Cambridge, demostró que el revestimiento de las depresiones y vesículas constituía una suerte de canasto reticular cuya materia prima la formaba una proteína; clatrina, la bautizó Pearse. Dentro del cesto de clatrina había una esfera de membrana y, en ella, diversas proteínas, incluidos receptores unidos y ligandos.

El receptor mejor descrito hasta la fecha es el de la lipoproteína de baja densidad (LDL), que ha sido estudiado con admirable detalle por Michael S. Brown y Joseph L. Goldstein, del Hospital Clínico de la Universidad de Texas en Dallas. El receptor de la LDL tiene por misión transportar colesterol del plasma sanguíneo al interior celular, donde se emplea para fabricar nuevas membranas. Otros receptores bien caracterizados son los de la transferrina y la ferritina, proteínas transportadoras de hierro; tales receptores revisten especial interés en nuestra investigación sobre la locomoción celular.

La unión de un ligando a un receptor vacío inicia un ciclo de endocitosis. Si el receptor no está ya en un hoyo revestido, se difunde en el plano de la membrana hasta que da con uno en proceso de formación y se integra en él. No todas las proteínas de superficie participan en la endocitosis. Desconocemos por qué algunas proteínas (las circulantes) se integran en los hoyos revestidos y siguen el ciclo por toda la célula, mientras que otras (las no circulantes) se excluyen de esas depresiones. Cuando se han integrado suficientes receptores en el hoyo revestido, éste se injerta en el citoplasma en un proceso que dura aproximadamente un minuto.

Una vez en el interior celular, la vesícula pierde casi de inmediato su cobertura, liberando clatrina para posteriores ciclos de endocitosis. La vesícula, desprovista de forro —pero que por-



3. MOLECULAS PROTEICAS insertadas en la membrana plasmática (exterior) de la célula animal. La matriz de la membrana es una bicapa de moléculas de lípidos (grasas). Las proteínas insertadas en ella desarrollan varias funciones; algunas bombean pequeñas moléculas (aminoácidos, azúcares e iones inorgánicos); otras actúan de receptores que se unen a nutrientes (a menudo denominados ligandos), que pasan al interior celular a través del proceso de endocitosis. Unas proteínas de superficie, receptores incluidos, circulan a través de la célula siguiendo el ciclo endocítico; otras, en cambio, eluden esa vía.

MEDIO
LIGANDOS
CITOPLASMA
ENDOCITOSIS
CLATRINA
EXOCITOSIS
LIGANDOS ELIMINADOS

4. CICLO ENDOCITICO, que invagina una porción de membrana en el interior de la célula y luego la devuelve a la superficie. Los receptores, que por regla general llevan unido un ligando, se integran en un hoyo revestido, una oquedad de la superficie celular que presenta una capa de la proteína clatrina en su cara citoplasmática (interior). La depresión se hincha hacia el citoplasma y se desprende formando una vesícula revestida, que no tarda en perder la cubierta de clatrina. A continuación, los ligandos se separan de sus receptores y se eliminan por procesos complejos que no se conocen todavía con detalle. En última instancia, los lípidos de membrana y los receptores se reintegran en la membrana plasmática en el proceso de exocitosis, que también se conoce mal.




5. HOYOS REVESTIDOS en plena generación e introduciéndose en el citoplasma para formar vesículas, captados en estas micrografías electrónicas que realizaron Nichol Thompson y el autor. El borde denso de la depresión es la cubierta de clatrina. Los puntos negros que aparecen en el hoyo corresponden a moléculas de ferritina, densa a los electrones, unidas a sus receptores específicos insertos en la membrana.

ta los ligandos, receptores y lípidos– se fusiona con el orgánulo denominado endosoma, dentro del cual los ligandos se separan de sus receptores en un proceso cuyos detalles se nos escapan. Los receptores y las moléculas lipídicas asociadas regresan posteriormente a la membrana por vía de la exocitosis, proceso que tampoco se conoce bien. Una vez devueltos a la membrana, los receptores quedan a disposición del siguiente ciclo.

Es digno de mención que, por medio de exocitosis y endocitosis, un fibroblasto puede reciclar una extensión equivalente a su superficie completa en un breve período de tiempo. Los hoyos revestidos se encuentran diseminados al azar sobre la superficie celular y, en un momento cualquiera, alrededor del 2 por ciento de membrana plasmática corresponde a esas invaginaciones revestidas. Puesto que la vida media de una depresión viene a ser de un minuto, el fibroblasto emplea un área equivalente a su propia superficie cada 50 minutos. Tan espectacular recirculación de la envoltura celular es la que permite el movimiento celular.

Según el modelo de movimiento propuesto por Abercrombie, la membrana empleada en el ciclo de endocitosis se reintegra en el borde anterior de la superficie celular. ¿Sucede verdaderamente así? ¿Se reinserta la membrana reciclada en el borde anterior de la célula? La cuestión, aunque de la mayor importancia, se presta mal al ensayo directo. Pero no está todo perdido. El conocimiento de que la membrana circulante consta sólo de un puñado de receptores y lípidos permite predecir algo susceptible de comprobación. En concreto, la hipótesis se refiere a la distribución de los receptores sobre la superficie celular; en 1983, en el Laboratorio de Biología Molecular, Nichol Thomson y el autor decidieron comprobarla.

Si la membrana sólo sufre exocitosis en la parte frontal de las células de gran tamaño, entonces los receptores deberían concentrarse en esa zona. Expliquemos esa ilación lógica. Supóngase que, entre ciclos sucesivos de endocitosis, un receptor permanece cuatro minutos en la superficie celular y luego es capturado por un hoyo revestido en formación. Al igual que otras proteínas, los receptores tienen libertad para difundirse en el plano de la membrana y, durante esos cuatro minutos que pasa en la superficie, un receptor típico puede avanzar unos 20 micrometros. Si la célula fuera menor –de 10 micrometros de longitud– los receptores podrían atravesarla en menos de cuatro minutos y, por tanto, la célula presentaría en cualquier instante una distribución superficial uniforme de esos receptores. Sin embargo, en una célula de 100 micrometros, un receptor típico recorrería sólo una quinta parte del camino de regreso antes de ser recapturado y devuelto al frente: en el borde anterior se arracimaría gran número de receptores.

Tales cálculos nos permitieron a Thomson y a mí suponer que los receptores se concentrarían en el borde anterior, hipótesis que se comprueba con facilidad. Decidimos examinar la distribución de los receptores de la ferritina sobre una gran célula de borde rugoso. Se eligieron los receptores de la ferritina por dos razones: son proteínas circulantes y se detectan fácilmente en el microscopio electrónico. Por comodidad trabajamos con células gigantes HeLa, que pueden obtenerse a partir de la línea celular HeLa, que deriva de un tumor humano. Las células HeLa gigantes semejan huevos fritos. Son redondeadas y planas, con un núcleo central a modo de yema y un borde rugoso en su perímetro. El borde rugoso ribetea la célula por todos lados, por lo que ésta tiende a avanzar en todas direcciones a la vez y, así, no se mueve. Sin embargo, parece probable que el mecanismo de formación del borde rugoso sea idéntico al de células que sí avanzan.

Thomson y el autor expusieron brevemente las células gigantes HeLa a la ferritina a cero grados Celsius, temperatura suficiente para frenar la difusión e impedir la endocitosis. En esas condiciones, los receptores de la ferritina de la superficie celular se unirían a moléculas de ferritina, pero la distribución de los receptores de la ferritina no cambiaría por difusión o endocitosis. El resultado sería, por tanto, una "instantánea" de la distribución de los receptores en un momento dado. Después de marcar las células con ferritina, se fijaban, cortaban en secciones y examinaban al microscopio electrónico, en búsqueda de las moléculas de ferritina unidas a sus receptores. Como se había supuesto, los receptores de la ferritina aparecían muy concentrados en el borde celular anterior. Se encontró una distribución similar, en ese mismo tipo de células, para los receptores de la LDL y de la transferrina. Por el contrario, las proteínas no circulantes aparecían distribuidas sobre la superficie de forma más o menos aleatoria.

Por ese mismo tiempo, Peter Ekblom, Irma Thesleff, Veli-Pekka Lehto e Ismo Virtanen, de la Universidad de Helsinki, dieron cuenta de observaciones parecidas en fibroblastos en movimiento. En conjunto, esos experimentos ponían de manifiesto que la exocitosis se registraba en el borde anterior de las células móviles. Más aún, por medio de cálculos directos se demuestra que el proceso de exocitosis dirigido hacia el borde anterior se basta para explicar el movimiento de avance observado en los fibroblastos.

Lo dije antes, la endocitosis permite la resorción de un 2 por ciento de la superficie del fibroblasto en un minuto. La exocitosis de toda esa membrana en el frente de la célula aportaría una extensión de alrededor del 1 por ciento de la longitud celular total (ya que la mitad de la membrana sometida a exocitosis va a parar a la superficie celular superior y, la otra mitad, a la inferior). Si el fibroblasto midiera 100 micrometros de longitud, su borde anterior se prolongaría a una velocidad de alrededor de un micrometro por minuto, y un objeto unido a la membrana (por ejemplo, una partícula de carbón) se movería hacia atrás a la misma velocidad, lo que se ajusta muy bien a la velocidad medida en el trabajo de Abercrombie con partículas de carbón.

Hasta aquí la analogía del "carro de

combate" ha brindado una descripción bastante adecuada del flujo membranar. Pero si se profundiza en el detalle, se desmorona la comparación. En primer lugar, durante el ciclo gira la cadena entera del carro, mientras que sólo algunos componentes de la membrana (los lípidos y las proteínas circulantes) participan en la endocitosis. En segundo lugar, aunque la cadena avanza con marcha uniforme en todo el ciclo, el flujo membranar disminuye hacia la parte posterior de la célula. El motivo de la deceleración se hace patente en cuanto traemos a colación la partícula de carbón unida a la superficie celular. La partícula se mueve hacia atrás sólo cuando un pedazo de membrana que está detrás de ella (hacia el borde posterior) sufre endocitosis y se transporta al frente celular. La endocitosis que se produzca por delante de la partícula no provoca desplazamiento hacia atrás [*véase la figura 7*].

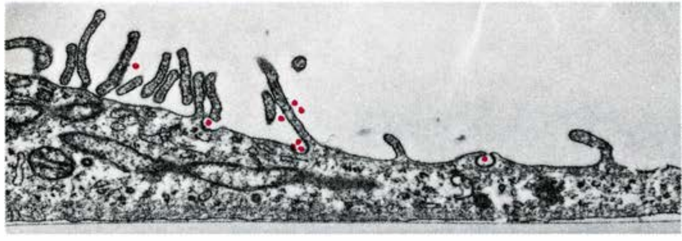
Ahora bien, conforme la partícula retrocede, disminuye la distancia superficial que la separa del borde trasero. Por tanto, puesto que los hoyos revestidos se distribuyen al azar sobre la superficie, se registra menos endocitosis detrás de la partícula que ante la misma. En consecuencia, disminuye la velocidad del movimiento hacia atrás. Si la velocidad de retroceso es de un μm por minuto en el borde anterior, será de 0,5 μm en el centro. Cuando la partícula alcanza el borde trasero, no se registra endocitosis detrás de ella y su movimiento cesa.

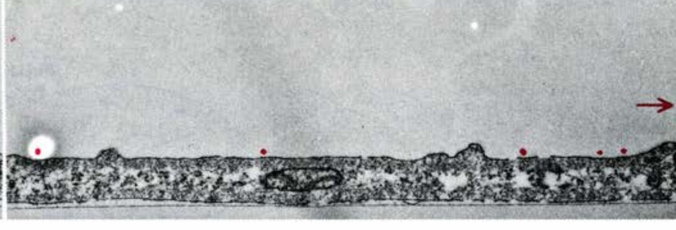
Hasta ahora, me he venido ocupando sobre todo de las proteínas circulantes, pero el flujo membranar presenta también interesantes implicaciones para las proteínas de superficie no circulantes. Las proteínas que no circulan sufren un continuo arrastre hacia atrás por parte del flujo y, al no entrar en los hoyos revestidos, tampoco las transporta hacia delante la endocitosis. Pero ocurre que esas proteínas son objeto de difusión, que tiende a repartirlas al azar y que actúa en contra del flujo unidireccional de retroceso. ¿Gana el flujo o la difusión? La velocidad a la que se difunden depende de su forma y tamaño. Una proteína que se difunda rápidamente apenas será arrastrada por el flujo hacia atrás; tal predicción se ha verificado en varias observaciones.

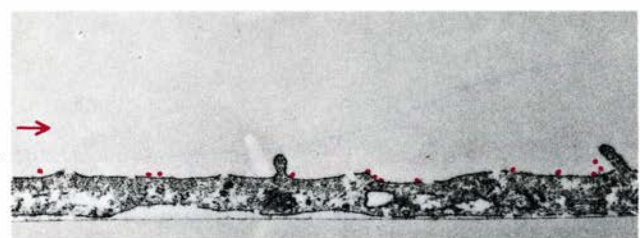
Ahora bien, una proteína que se difunda con lentitud podría verse arrastrada hacia la parte posterior de la célula y acumularse en ella. Se desconocía esas proteínas hasta que, hace poco, Akira Ishihara, Bruce F. Holifield y Kenneth A. Jacobson, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Carolina del Norte, examinaron la distribución de una proteína que llamaron GP80 sobre la superficie de fibroblastos en movimiento. Varios años antes, Pearse, Thompson y yo habíamos demostrado que la GP80 no entraba en los hoyos revestidos y, por tanto, no era circulante. Ishihara y sus colegas comprobaron que la proteína se difundía muy despacio. Observando su distribución en fibroblastos en movimiento encontraron 20 veces más GP80 en la porción posterior de la célula que en la anterior. No cabía duda de que el flujo membranar arrastraba inexorablemente las proteínas de difusión lenta hacia la parte trasera de las células móviles.

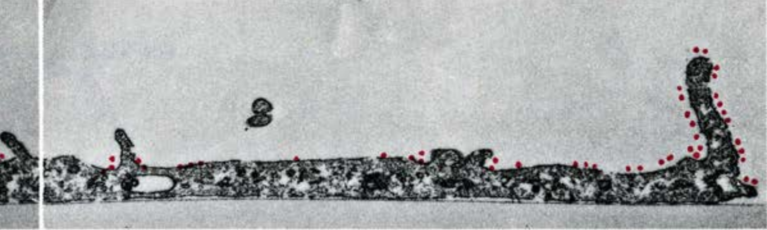
La verdad es que ese fenómeno se había descubierto mucho antes en un contexto diferente. En 1971, Roger B. Taylor y W. Philip H. Duffus, de la Universidad de Bristol, junto con Martin C. Raff y Stefanello de Petris, del Instituto de Investigaciones Médicas del correspondiente Consejo Nacional estadounidense, realizaron un importante hallazgo. Estudiaban el comportamiento de los anticuerpos sobre la superficie de los linfocitos *B* del ratón (un tipo de glóbulos blancos). Se exponían las células de ratón a proteínas de conejo, que entrelazan los anticuerpos en grandes racimos sobre la superficie del linfocito. Cuando se examinaban las células por una técnica de fluorescencia, aparecían manchas brillantes: islotes de anticuerpos entrelazados. Lo más sorprendente era que, si se caldeaba las células por encima de la baja temperatura a la que se habían añadido las proteínas de conejo, las manchas brillantes emigraban hacia la parte posterior de la célula, donde formaban un "caperuza".

En 1971 no se conocía todavía bien el ciclo endocítico, y nadie asoció el fenómeno de la formación de la caperuza con ese proceso. Hoy sabemos que la formación de esa estructura responde a las mismas fuerzas que pro-









6. CELULA GIGANTE HeLa, mostrada fragmentariamente en dos secciones perpendiculares. En ella se analizó la distribución de los receptores de la ferritina y otras proteínas circulantes sobre la superficie de las células móviles. Sólo se observa la lamela anterior, que representa alrededor de la quinta parte de su longitud. El borde anterior queda abajo, a la derecha. Los receptores de la ferritina están marcados por la presencia de moléculas de ferritina unida a ellos. Se advierte que los receptores (*puntos de color*) se concentran en el borde rugoso. El experimento corroboró que, en las células móviles, el reciclaje de la membrana es un proceso direccional: aunque los hoyos se distribuyen por la superficie celular al azar, tan sólo se produce exocitosis en el borde anterior.

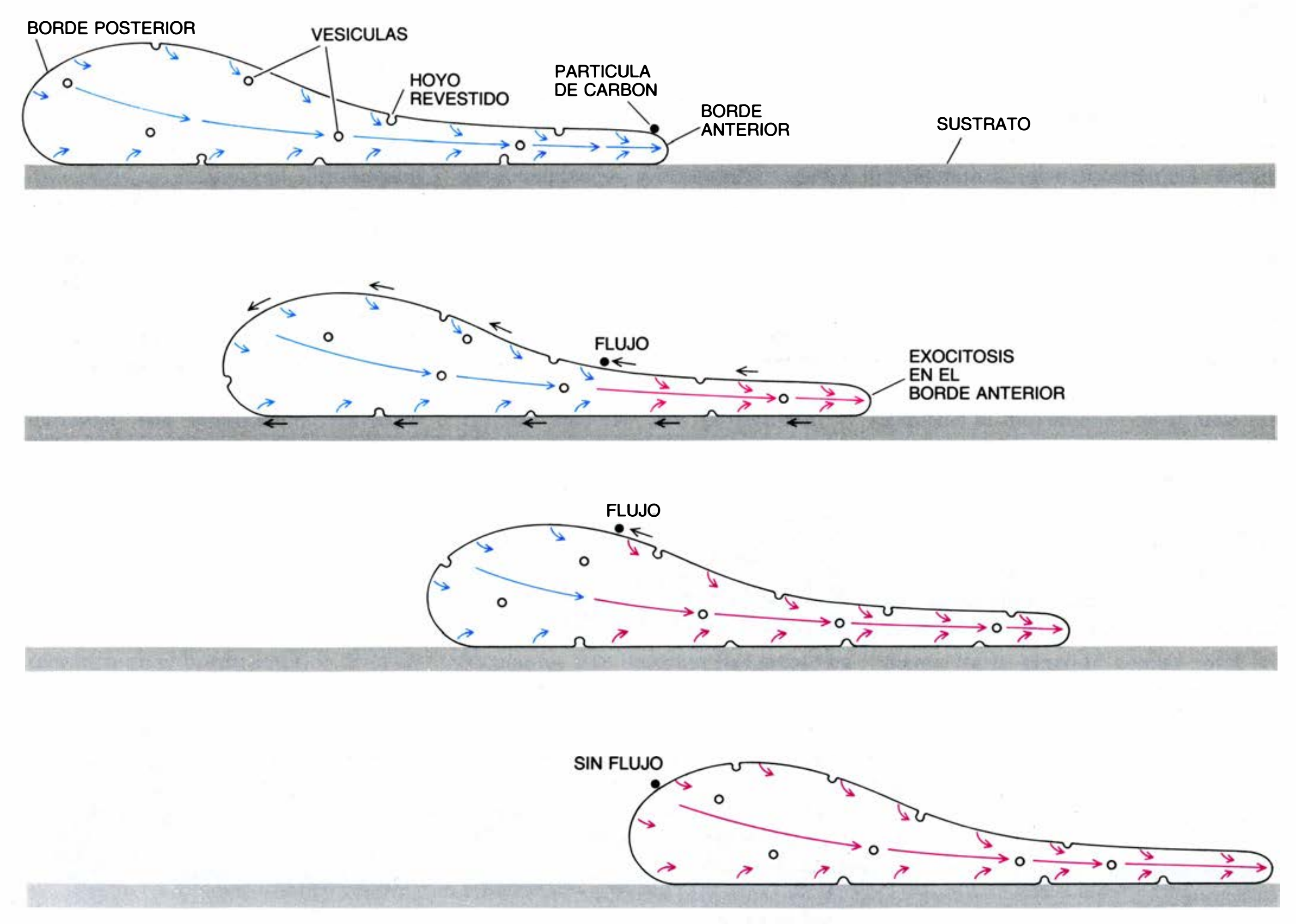
vocan la acumulación de la GP80 en la parte posterior de la célula en movimiento. Las moléculas de anticuerpo, libres, se difunden con celeridad suficiente para evitar su arrastre hacia la parte posterior de la célula, pero la masa entrecruzada se difunde mucho más despacio y, como la GP80, acaba en el fondo. La similitud de ambos procesos se corroboró con el descubrimiento de que la formación de la caperuza se producía en todas las células móviles, pero no en las inmóviles.

Se ha adelantado mucho en el conocimiento de la formación de la caperuza, el flujo de membrana asociado y el proceso general de la locomoción celular; queda pendiente, sin embargo, la cuestión de cómo se inicia o se detiene el proceso global de la locomoción. Suele considerarse que todas las células animales están intrínsecamente capacitadas para moverse, pero que no siempre se aprovecha esa capacidad. Muchas células, incluidos los fibroblastos, son estáticas en cultivos de laboratorio. Cuando se cultivan, las células se extienden y pueden permanecer inmóviles. No exhiben bordes rugosos; las proteínas entrelazadas no forman caperuzas, señal de que no se produce flujo membranar. A pesar de ello, se demuestra que, en las células inmóviles, la endocitosis alcanza una actividad comparable a la de las móviles. Cabe concluir, entonces, que en las células inmóviles la membrana que pasa a los hoyos revestidos no se devuelve a la superficie en un solo sitio, pues de otro modo la célula se movería hacia adelante a partir de ese punto, y habría un flujo de membrana hacia atrás.

En efecto, esa diferencia constituye lo que quizá sea el dato más importante sobre el movimiento celular. En las células móviles, la exocitosis es un proceso dirigido: la membrana invaginada por endocitosis sufre exocitosis sólo en el borde anterior de la célula. En células estáticas, por el contrario, la exocitosis no está dirigida: la membrana ingerida se reinserta al azar por la superficie celular.

Para mayor sorpresa, esa diferencia crucial resulta fácilmente reversible. En condiciones de cultivo celular adecuadas, el movimiento de un fibroblasto tarda pocos minutos en arrancar. La exocitosis errática presente en las células inmóviles inicia su avance hacia el borde anterior, como requiere el movimiento. No se precisa síntesis de nuevas proteínas para que ocurra el cambio: los fármacos que bloquean la síntesis proteica no entorpecen el proceso. Según parece, el fibroblasto inmóvil posee la maquinaria bioquímica necesaria para la locomoción, pero esa maquinaria no se encuentra en la configuración adecuada. Cuál pueda ser la configuración correcta y cómo se adquiera son cuestiones que quedan para el futuro.

Ahora mismo, me preocupa más un



7. MODELO DE FLUJO DE MEMBRANA para la locomoción de las células animales basado en la endocitosis direccional. Si una célula se topa con una partícula de carbón, ésta puede unirse al borde anterior de la célula (*1*). La exocitosis de la membrana en ese borde desplaza la membrana hacia atrás, originándose un flujo que arrastra con él la partícula de carbón (*2*); la partícula sirve, por tanto, de marcador del flujo membranar. Cuando el carbón se aproxima al centro de la célula, su movimiento ha disminuido ya considerablemente (*3*); por una doble razón: únicamente los hoyos revestidos que se crean entre la partícula y el borde posterior y generan vesículas que se funden con la membrana en el borde anterior la impulsan hacia atrás, y porque cuanto mayor es la distancia recorrida por la partícula tanto menor resulta el número de hoyos capaces de impulsarla. Cuando ha llegado al borde posterior, la partícula se detiene (*4*).

problema cuyo análisis sí puede abordarse por experimentación: la interacción entre las células móviles y su sustrato. Es sabido que, en sus ambientes naturales, las células se arrastran sobre un complejo entramado de moléculas conocido por matriz extracelular, formada sobre todo por la proteína colágeno y varios polisacáridos de cadena larga. Incluidas entre el entramado aparecen ciertas proteínas especializadas —generalmente muy grandes— que la célula reconoce cuando le salen al paso. Una de las proteínas es la fibronectina, a la que se adhiere el fibroblasto en movimiento [véase "Fibronectinas", por Richard O. Hynes; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1986].

La adhesión celular esta mediada por un receptor para la fibronectina situado en la membrana plasmática. El receptor reconoce la fibronectina y se une a ella, formando un "pie" que proporciona la tracción para el movimiento de avance. Aunque no se conoce bien cómo funciona ese receptor, el autor ha desarrollado una hipótesis de trabajo basada en la suposición de que los receptores son proteínas circulantes.

A medida que el fibroblasto avanza, los receptores de la fibronectina ligan y liberan continuamente fibronectina. En el frente de la célula, los receptores ligan fibronectina. Mientras están unidos, los receptores no pueden difundirse por la membrana, pues se encuentran unidos, de forma indirecta, a la rígida matriz extracelular. Así, el flujo membranar hacia atrás las empuja, generándose la tracción locomotora. Conforme se integra la membrana en el frente celular, los pies retroceden. En cuanto un receptor se libera de la fibronectina, puede difundirse en un hoyo revestido, que le lleva al borde anterior de la célula para unirse de nuevo a la fibronectina.

Por ahora se trata sólo de una hipótesis. El propio funcionamiento de los pies no es más que una de las muchas preguntas sobre el movimiento de las células animales que aguardan respuesta. ¿Cuál es la fuente de energía del movimiento celular? ¿Qué distingue a las proteínas circulantes de las no circulantes? Las cuestiones más desafiantes tienen que ver con el control de la exocitosis. ¿Qué caracteriza al borde anterior de una célula móvil para que la exocitosis se produzca en él y no en otro sitio? Incluso más importante para entender la metástasis y para el tratamiento del cáncer: ¿qué es lo que impulsa a una célula sedentaria a ponerse en movimiento?

Fractura del vidrio

Las interacciones atómicas que subyacen a la fractura del vidrio no se habían definido hasta hace muy poco. Sugerimos aquí formas de retardar, o incluso detener, la propagación de grietas en el vidrio y otros materiales frágiles

Terry A. Michalske y Bruce C. Bunker

El vidrio es uno de los productos de consumo más antiguos y difundidos. Su producción, cuyo origen se remonta nueve milenios atrás, representa hoy sólo en los Estados Unidos una industria que mueve más de 20.000 millones de dólares. Mas, a pesar de su dilatada historia, que ha satisfecho un abanico muy amplio de necesidades de los consumidores, las aplicaciones del vidrio han estado siempre limitadas por su tendencia a la fractura. Esta debilidad inherente constituye un reto permanente para los diseñadores. Las nuevas y prometedoras tecnologías que demandan redes de fibra óptica, prótesis cerámicas de huesos o nuevos componentes ópticos y electrónicos, conceden un interés privilegiado a los vidrios y las cerámicas que se muestren especialmente resistentes a quebrarse. Un cable transoceánico de fibra óptica, por ejemplo, debe tener una vida operativa de longitud suficiente para hacer viable la empresa de que el cable repose en el fondo oceánico.

Hasta hace poco, no se sabía apenas nada sobre el mecanismo de agrietamiento del vidrio. A mediados de los años sesenta, por ejemplo, cuando los investigadores daban cuenta de que la tensión necesaria para romper el vidrio disminuía al aumentar su exposición al agua, quedaba patente por qué el agua ayudaba a los cortadores de vidrio; pero no se avanzaba en el conocimiento del proceso exacto. En 1979, sin embargo, comenzó a elaborarse una respuesta que permitía resolver el misterio. Ese año, los autores del artículo y sus colegas de los Laboratorios Nacionales Sandia, por un lado, y Stephen W. Freiman, de la Oficina Nacional de Pesos y Medidas, por otro, decidieron desarrollar modelos matemáticos y químicos para describir la fractura del vidrio en su nivel atómico. Modelos que se encuentran todavía en fase de refinamiento, si bien los esfuerzos se han visto ya recompensados. Las interacciones físicas y químicas que controlan la rotura de los enlaces interatómicos del extremo de una grieta dan lugar a una unión fascinante entre la estructura atómica de los materiales y las preocupaciones del mundo real referentes a la fiabilidad de los productos. Además, el conocimiento fundamental aportado por los estudios atómicos de la propagación de las grietas mejora la capacidad de utilización del vidrio y otros materiales de óxidos en muchas de las exigentes aplicaciones actuales.

Todos hemos visto, desde niños, cristales rotos: un vaso o una jarra que se han caído, una ventana que ha saltado en pedazos de una pedrada o un pelotazo. Hemos sentido entonces la impresión de que vaso, jarra y hoja de la ventana se hacían añicos de una manera instantánea. Pero una fotografía de alta velocidad nos revelaría que las grietas avanzan por el vidrio a velocidades de cientos de metros por segundo: la mitad, más o menos, de la velocidad del sonido en ese medio.

Aunque puede darse una rotura brusca del vidrio, muchas vienen precedidas por la propagación lenta de grietas que ya existían con anterioridad. Un buen ejemplo de ello se encuentra, a menudo, en un parabrisas de automóvil. La propagación de una pequeña grieta, que puede haber comenzado por el impacto de una piedra, puede avanzar día a día y extenderse gradualmente a través del parabrisas entero. En otros casos, pequeñas e insignificantes grietas superficiales pueden crecer durante un período de incubación, y producir una rotura catastrófica cuando alcanzan un tamaño crítico. Las grietas pueden crecer en el vidrio a velocidades inferiores a la billonésima de centímetro por hora; en estas condiciones, el período de incubación puede abarcar varios años, hasta que se observa la rotura catastrófica. En el dominio atómico, el lento crecimiento de las grietas corresponde a la ruptura secuencial de enlaces interatómicos, a velocidades lentísimas, de una ruptura de enlace por hora. El amplio espectro de velocidades a las que puede fracturarse el vidrio, que varía en 12 órdenes de magnitud desde el brusco estallido hasta la propagación lenta, confiere especial atractivo a la investigación del crecimiento de grietas.

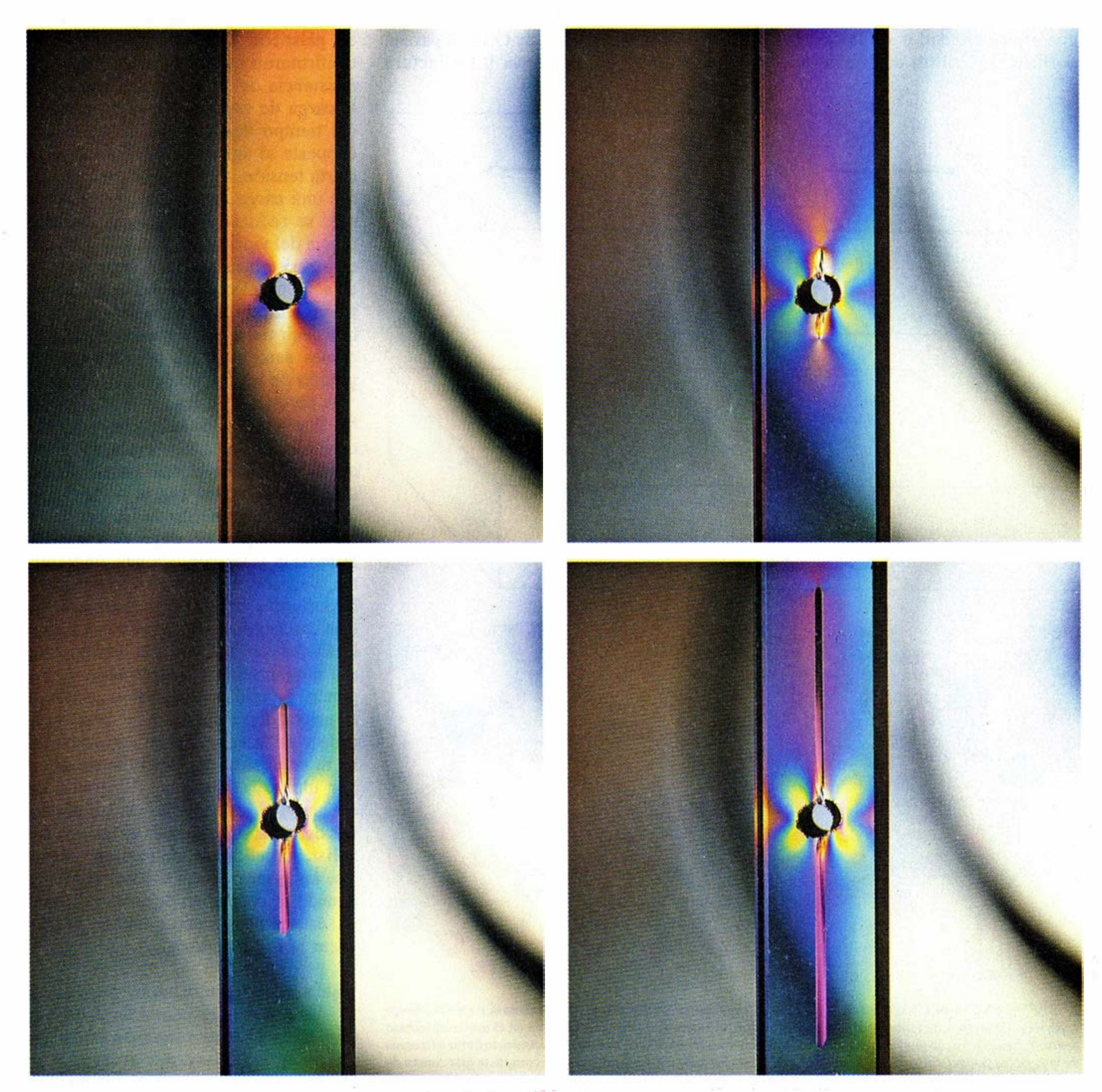
Para nuestra sorpresa, el vidrio constituye uno de los materiales de mayor resistencia intrínseca que se conocen. En condiciones de alto vacío, el vidrio sin imperfecciones puede soportar cargas de tracción 200.000 atmósferas, valor que decuplica la resistencia de la mayoría de las aleaciones metálicas comerciales. En su uso normal, sin embargo, las superficies de vidrio están expuestas a abrasivos y productos químicos que crean pequeñas grietas superficiales, cuyo crecimiento promueven, lo que acaba por minar la resistencia del vidrio. El efecto de los productos químicos sobre la velocidad de crecimiento de las grietas establece el máximo reto para el ingeniero de diseño, ya que estos efectos no sólo reducen la resistencia inmediata del vidrio, sino que pueden terminar también en el fallo de una estructura que ha soportado una carga de esfuerzo durante varios años.

Uno de los agentes químicos más potentes es el agua, que representa una amenaza de especial gravedad porque siempre se halla en la atmósfera. El agua acelera la velocidad de crecimiento de una grieta en más de un millón de veces y ataca la estructura del vidrio en la mismísima raíz de la grieta. Gran parte de nuestro trabajo se ha centrado en la comprensión, desde un punto de vista atómico, de cómo el agua y otras sustancias químicas avivan el crecimiento de las grietas; nos hemos preocupado también por desentrañar la

forma de frenar, parar e incluso invertir este proceso.

Los cristaleros saben de la capacidad del agua para producir más fácilmente el agrietamiento del vidrio. Y lo tienen en cuenta en su trabajo. Hay pruebas de que los indios americanos anteriores al Descubrimiento aprovechaban el efecto del agua en la fabricación de puntas de flecha de pedernal, una forma de sílice (dióxido de silicio) relacionada con el vidrio, la arena y el cuarzo. Los indios que habitaban en las riberas del lago Catahoula, Louisiana, por ejemplo, celebraban una ceremonia en la que exponían al vapor los pedernales antes de quebrarlos. Experimentos recientes con materiales similares confirman que la fractura se facilita empapando el pedernal en agua. Los vidrieros actuales aplican agua, generalmente en forma de saliva, a la grieta poco profunda producida por su herramienta de marcar. El agua relaja la tensión necesaria para propagar la grieta inicial y causa una ruptura más suave del vidrio.

Hace 60 años, A.A. Griffith, del Royal Aircraft Establishment, sentaba las bases científicas que permitirían determinar las condiciones requeridas para el crecimiento de las grietas y su fractura. Griffith buscaba calcular la energía mínima necesaria para hacer crecer una grieta. Comenzó con la observación, bien conocida, de que los átomos de la superficie de un sólido forman la red de manera distinta de como lo hacen los del interior: los átomos se asientan de forma un tanto incómoda en la



1. CRECIMIENTO DE GRIETAS en una barra de vidrio con un agujero perforado en su centro, registrado en una serie de experimentos realizados por los autores en los Laboratorios Sandia. La carga de compresión aplicada a lo largo de la dirección de la barra crea una carga de tracción que propaga dos grietas, una por encima del agujero y otra por debajo. La velocidad de crecimiento de la grieta se mide con un microscopio situado encima del dispositivo. El conjunto entero se introduce en una campana de alto vacío para que pueda controlarse el entorno químico. En este caso, se ha agregado vapor de agua que acelera el crecimiento de las grietas. Las fotografías, realizadas con luz polarizada, muestran que las tensiones se concentran en el extremo de las grietas en progresión.

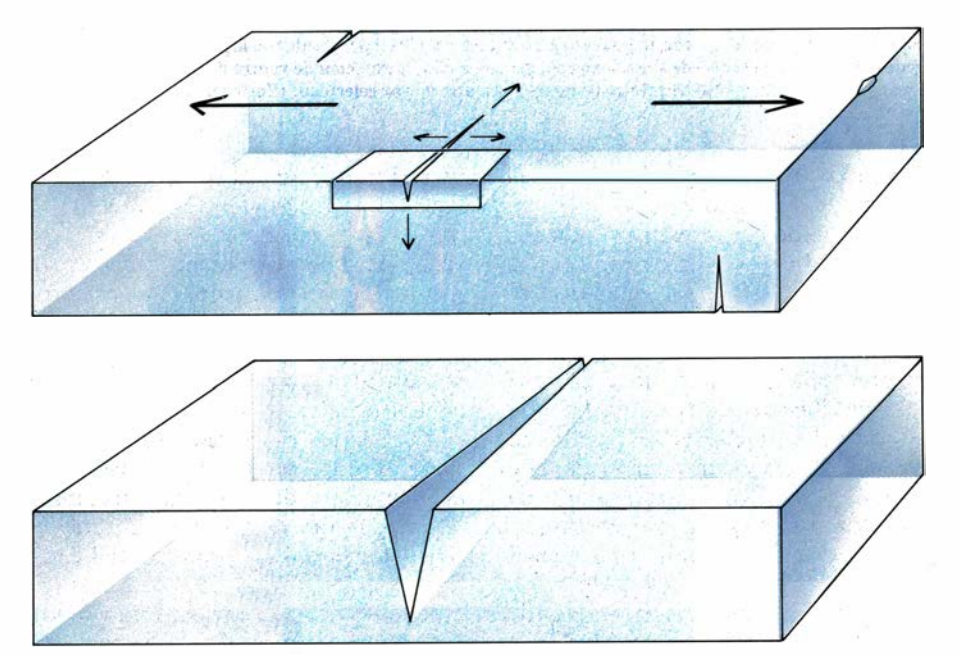
superficie del sólido; por eso, su energía es mayor que la energía de los átomos interiores. En virtud de ello, cada vez que se crea una nueva superficie debe suministrarse energía. Griffith razonó que una grieta puede crecer en el vidrio sólo cuando la energía mecánica aplicada, o tensión, es mayor que la energía de las nuevas superficies creadas por la fractura. (La energía se almacena en el vidrio, como si fuera un muelle, hasta que la tensión aplicada supera el mínimo.) Conocida la energía superficial del vidrio y usando los cálculos existentes acerca de las tensiones generadas alrededor de las grietas superficiales, Griffith determinó la carga de ruptura para placas agrietadas y confirmó con éxito su predicción en experimentos reales con tubos de vidrio.

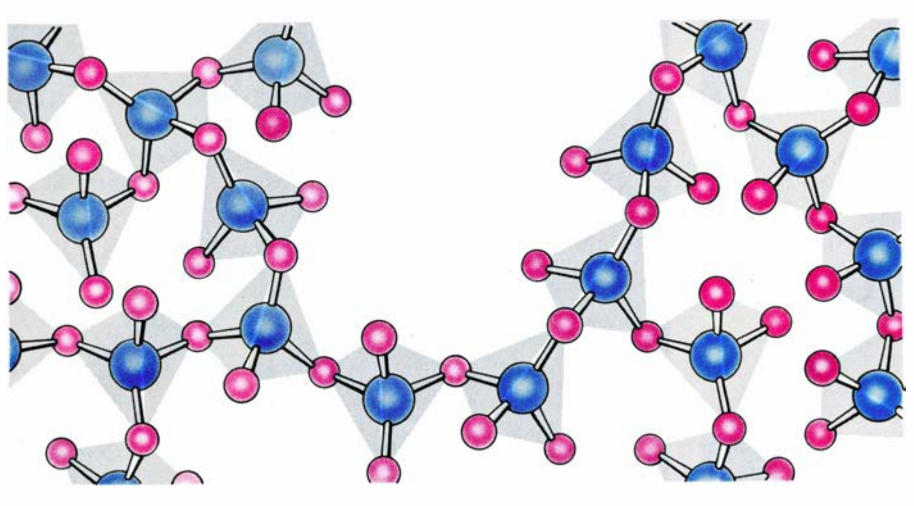
Griffith determinó también que, cuanto menor es la grieta inicial en un trozo de vidrio, mayor debe ser la tensión aplicada para propagarla. Eso explica por qué las fibras de vidrio originales, con sólo minúsculos fallos superficiales, son de 100 a 1000 veces más resistentes que el vidrio de las ventanas, que suele adquirir defectos superficiales bastante notables en el proceso de su manipulación. El método de equilibrio energético de Griffith para el estudio de la resistencia y la fractura sugería también la importancia de la química de superficies en el comportamiento mecánico de los materiales frágiles. Las sustancias químicas que disminuyen, como el agua, la energía superficial de un sólido acaban minando la resistencia del material.

Las décadas de los cincuenta y los sesenta asistieron a una febril actividad en el estudio experimental de la resistencia del vidrio. Entusiasmo que venía estimulado, en buena parte, por los avances en la capacidad de producir filamentos continuos de vidrio (fibra de vidrio) que podían servir para reforzar el plástico. Diversos investigadores confirmaron que el agua menguaba la resistencia del vidrio y mostraron que la carga de ruptura dependía también del tiempo durante el cual se hallara expuesta al agua una fibra sometida a cierta tensión. Observaron que, al aplicar una carga durante sólo dos semanas, se reducía en tres veces la resistencia del vidrio. Parecía, además, que esta resistencia caería a cero después de someter el vidrio a una carga durante un tiempo suficientemente largo. Ni que decir tiene que semejantes apreciaciones sembraron la inquietud en el gremio de los fabricantes de vidrio.

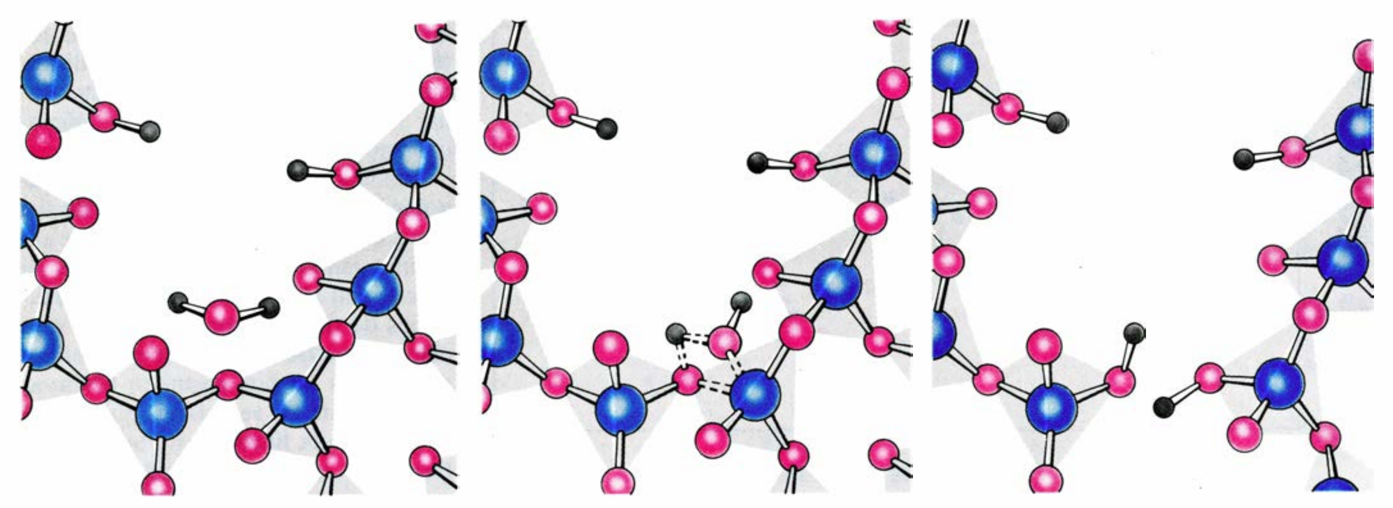
A mediados de los sesenta, Sheldon M. Wiederhorn, de la Oficina Nacional de Pesos y Medidas, y otros investigadores estudiaron la variación de la resistencia del vidrio con el tiempo. Midiendo el crecimiento de las grietas en un microscopio, sin dejar de controlar la tensión y las condiciones ambientales, llegaron a varios descubrimientos importantes. Primero, las grietas del vidrio crecían de manera continua y a velocidades controladas; la fractura no era ningún fenómeno instantáneo. Segundo, la velocidad de propagación de la grieta dependía de la tensión aplicada y de la cantidad de agua que hubiera en el entorno. Se podía predecir, por último, el instante de rotura conociendo el crecimiento de los pequeños defectos superficiales cuando se hallaban sometidos a una tensión; puesto que las grietas pequeñas del vidrio en tensión se extendían de forma paulatina, ésta se iba concentrando hasta provocar la rotura brusca.

Para nuestro infortunio, muchas de las roturas que ocurrirán dentro de diez años pueden surgir de pequeñas grietas iniciadas hoy, que avanzan a velocidades inferiores a una billonésima de centímetro por hora, celeridad que, como hemos mencionado, corresponde a la ruptura secuencial de enlaces in-





2. RESISTENCIA DEL VIDRIO controlada por el crecimiento de grietas que penetran en el material (*dibujo superior*). Cuando sometemos el vidrio a una tensión, el extremo de la grieta penetra en el material (*dibujo central*). Esa es la razón por la que los autores han abordado el estudio atómico del crecimiento de los extremos de las grietas (*modelo inferior*). La unidad básica del vidrio de sílice es un tetraedro compacto que consta de un átomo central de silicio (*azul*), rodeado por cuatro átomos de oxígeno (*rojo*). Cada átomo de oxígeno está compartido por los átomos de silicio de dos tetredros adyacentes; por lo que cada tetraedro se encuentra así conectado a cuatro vecinos. Los tetraedros forman una red de anillos interconectados, en la que cada uno de ellos contiene de cinco a siete tetraedros. Por mor de claridad, los átomos de oxígeno dibujados aquí son de menor tamaño que los átomos de silicio y no se muestran todos los enlaces con los tetraedros.



3. EL AGUA REACCIONA CON EL VIDRIO y provoca que éste se agriete antes. En la figura, una molécula de agua entra en la grieta (*izquierda*) y se adsorbe en el extremo de ésta (*centro*). La molécula produce una reacción química concertada (*derecha*), en la que un enlace de silicio-oxígeno del extremo de la grieta y un enlace de hidrógeno-oxígeno de la molécula de agua se desdoblan para producir dos grupos silanol (grupos hidroxilo unidos al silicio). En este proceso, la longitud de la grieta aumenta por rotura de un enlace. La reacción con el agua rebaja en un factor de 20 la energía necesaria para romper los enlaces de silicio-oxígeno; gracias a ello, la reacción de rotura de enlaces permite que las grietas progresen con una mayor celeridad. (Ilustración de Ian Worpole.)

teratómicos a la velocidad de un enlace por hora. Las técnicas experimentales actuales no están capacitadas para medir estas pequeñísimas velocidades de agrietamiento. Por cuya razón los autores se han esforzado por desarrollar un modelo atómico de lo que ocurre en el extremo de la grieta.

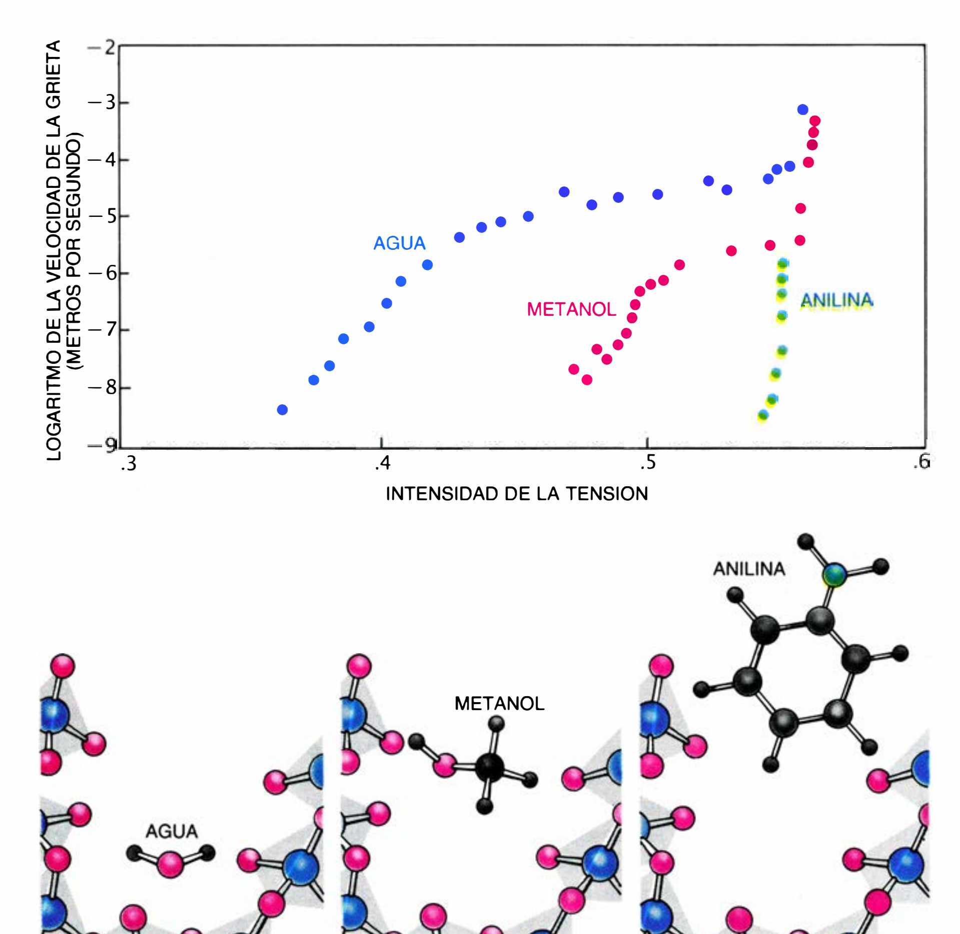
Para describir las reacciones atómicas que se producen en el extremo de la grieta, hay que comenzar por idear un modelo de la estructura del vidrio de sílice. El bloque básico que compone la mayoría de las formas de sílice es un tetraedro compacto que consta de un átomo central de silicio rodeado de cuatro átomos de oxígeno. Cada átomo de oxígeno de un vértice se comparte con los átomos de silicio de dos tetraedros adyacentes; así, cada tetraedro está unido a cuatro vecinos y establecen una red que ocupa todo el espacio. En las formas cristalinas del sílice, como el cuarzo, los tetraedros ocupan posiciones regulares que se repiten a través de la estructura cristalina. En el vidrio de sílice, los tetraedros forman una red aleatoria de anillos interconectados, cada uno de los cuales suele poseer de cinco a siete tetraedros [*véase la parte inferior de la figura 2*]. Al crecer la grieta, las unidades tetraédricas se separan, pues se rompen los enlaces silicio-oxígeno. El extremo de la grieta refleja las dimensiones de una estructura anular que se ha abierto por un lado, y deja expuesto el siguiente enlace silicio-oxígeno. La mínima distancia incremental en que puede desplazarse la grieta es el diámetro del anillo de silicato, que mide de 0,4 a 0,5 nanómetros (milmillonésima de metro). El valor exacto depende del número de tetraedros del anillo.

De acuerdo con nuestros resultados, la cantidad de energía que se necesita para romper el enlace silicio-oxígeno entre dos tetraedros de silicato cae bruscamente, en un factor de casi 20, en presencia de agua. Si un trozo de vidrio de sílice se mantiene en un vacío casi perfecto, los enlaces entre los tetraedros de silicato exhibirán una gran estabilidad. La verdad es que son tan estables que tendrían que consumirse 1300 calorías de energía para destruir los enlaces silicio-oxígeno de un gramo de sílice. (En comparación se necesitan 75 calorías de energía para calentar un gramo de agua desde temperatura ambiente hasta el punto de ebullición.) En presencia de agua, puede producirse, sin embargo, una reacción química entre una molécula de ésta y un enlace de silicio-oxígeno, facilitando así la separación de las unidades tetraédricas.

La descripción minuciosa de la interacción puede dividirse en tres pasos. Primero, una molécula de agua se abre camino por la apertura de la grieta y se adsorbe en el extremo de ésta. Los electrones sobrantes del átomo de oxígeno de la molécula de agua comienzan a formar un enlace con los orbitales electrónicos desocupados de un átomo de silicio. Mientras tanto, uno de los átomos de hidrógeno de la molécula de agua es atraído por un átomo de oxígeno de la cadena silicio-oxígeno. En el siguiente paso del proceso, los enlaces recién formados se fortalecen y se debilita el enlace de oxígeno original. El hidrógeno de la molécula de agua acaba por transferirse al oxígeno de la cadena y ésta se rompe. Por último, la molécula de agua y el enlace original silicio-oxígeno se separan; los reemplazan dos grupos silanol superficiales (grupos hidroxilo unidos al silicio). La grieta ha avanzado un paso atómico. El proceso completo se llama quimisorción disociativa.

En resumen, la reacción química entre la sílice y el agua reduce la cantidad de energía que debe suministrarse para la propagación de la grieta. El enlace silicio-oxígeno, de gran estabilidad, queda sustituido por dos productos de reacción de casi la misma estabilidad, los grupos silanol de la superficie. Como la energía consumida por una reacción química es igual a la diferencia entre las energías de los complejos inicial y final, puede mostrarse que la ruptura por el agua de los enlaces silicio-oxígeno necesita sólo 78 calorías por gramo, frente a las 1300 necesarias en condiciones de vacío.

El modelo de quimisorción disociativa en la ruptura del enlace del extremo de la grieta permite predecir qué sustancias químicas promoverán el crecimiento de grietas en la sílice. Estos productos podrán ceder electrones para la formación de un enlace con el átomo de silicio del extremo de la grieta y cederán también un hidrógeno, cargado positivamente, para unirse con el átomo de oxígeno que estaba unido, en un principio, al átomo de silicio. Además, la molécula sencilla del producto químico ha de ser suficientemente pequeña para acoplarse en el extremo de la grieta, de suerte que puedan darse simultáneamente la ruptura y la



4. TAMAÑO MOLECULAR de una sustancia química. Se trata de una magnitud que afecta a su capacidad para acelerar el crecimiento de grietas en el vidrio. El agua, que tiene un tamaño molecular de sólo 0,26 nanómetros (milmillonésima de metro), insta un crecimiento más rápido que el provocado por el metanol (0,36 nanómetros); la anilina (0,42 nanómetros) apenas si ejerce efecto alguno (*arriba*). En resumen, el agua puede entrar perfectamente en una abertura de grieta (que tiene un diámetro de 0,4 a 0,5 nanómetros), el metanol halla dificultades para entrar y la anilina nunca llegará a los lugares de rotura del enlace (*abajo*).

formación de enlaces. El amoníaco y el metanol, por ejemplo, cumplen ambos requisitos, y hemos comprobado que ambos aceleran la velocidad de crecimiento de las grietas en la sílice. Lo cierto es que el efecto del amoníaco, cuyas moléculas vienen a ser del mismo tamaño que las del agua, es casi idéntico al de ésta.

La velocidad de crecimiento de la grieta no depende sólo del entorno químico, sino también de la magnitud de la tensión aplicada. Antes de desarrollar un modelo que describa la cinética de la fractura, hay que conocer mejor el modo como la tensión acelera la reacción de ruptura de enlaces.

En ausencia de tensiones, la sílice reacciona muy lentamente con el agua. La reacción disociativa que hemos examinado provoca que la superficie del vidrio de sílice se disuelva en agua a una velocidad de 10^{-17} metros por segundo; sin tensión los enlaces superficiales silicio-oxígeno se muestran tan remisos a reaccionar con el agua, que ni siquiera la adsorberán en forma de vapor. Ello no obstante, la aplicación de una tensión puede instar el crecimiento de grietas a velocidades superiores a un milímetro por segundo.

El extremo de una grieta enfoca la tensión cual si se tratara de una punta de aguja ante un campo eléctrico. Cuanto más se acerca al extremo de la grieta, mayor se hace la tensión, hasta que alcanza un valor de varios cientos de miles de atmósferas a escasas dimensiones atómicas del extremo. Expuesta a esas tensiones tan elevadas, la estructura atómica de la sílice altera su configuración normal de enlace. De acuerdo con los cálculos teóricos, si un tetraedro de silicato se distorsiona tirando de los átomos de oxígeno de los vértices, resulta más probable que el átomo de silicio del centro se una con una molécula de agua. Además, la interacción química con el agua disminuirá la fuerza necesaria para distorsionar todavía más los enlaces de silicio-oxígeno.

Fundados en esos cálculos para diseñar la selección de un modelo de sistema químico, hemos investigado experimentalmente el aumento de la reactividad al aplicar una tensión. Hubimos de trabajar con un modelo sencillo porque las técnicas experimentales disponibles no nos permiten observar directamente las reacciones químicas a lo largo de la línea de átomos del extremo de la grieta. Nuestro modelo consiste en pequeños anillos de átomos de silicio y de oxígeno (dos átomos de silicio y dos de oxígeno por anillo). Estos anillos llamados de aristas compartidas, que se forman cuando dos unidades tetraédricas se unen por un arista, pueden constituirse en la superficie del polvo de sílice calentado a temperaturas superiores a 900 grados centígrados. Las estructuras de anillos de aristas compartidas sirven para estudiar los efectos de la deformación del enlace, ya que los ángulos y las distancias de enlace entre los átomos ofrecen una severa distorsión si los comparamos con los del vidrio de sílice normal.

Para examinar el mecanismo y la cinética de las reacciones entre el agua (y otros productos químicos) y los anillos de silicatos con aristas compartidas hemos empleado una técnica llamada transformada de Fourier de espectroscopía de infrarrojos. En la espectroscopía de infrarrojos, se baña una muestra con radiación infrarroja. La radiación transmitida a través de la muestra se divide en distintas frecuencias, y se mide la cantidad transmitida en cada una. A ciertas frecuencias, habrá una notable caída en la cantidad de radiación recibida por el detector. Este efecto se debe a que cada estructura molecular que hay en la muestra vibra a una frecuencia característica. Cuando esa frecuencia coincide con la de la radiación infrarroja, se produce un efecto de resonancia y la muestra absorbe la mayoría de la radiación, dejando que sólo una pequeña cantidad alcance el detector. Observando la frecuencia y la cantidad relativa de radiación absorbida, se determina qué estructuras moleculares forman la muestra y cuál es la concentración relativa de cada especie.

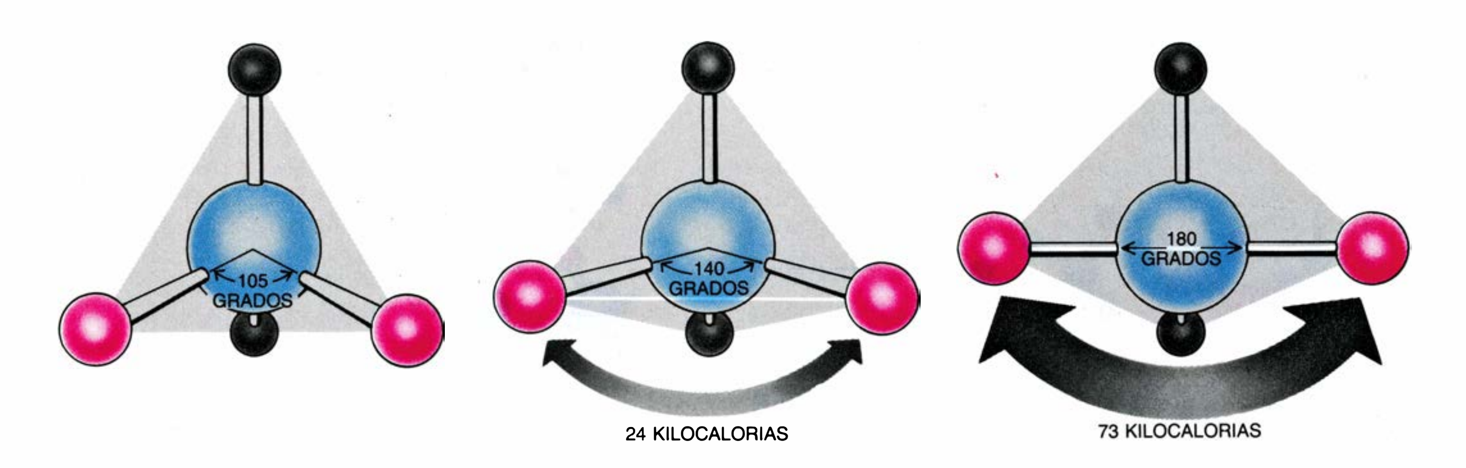
En la transformada de Fourier de espectroscopía de infrarrojos no se detectan las frecuencias una a una, sino que se utilizan técnicas de interferencia

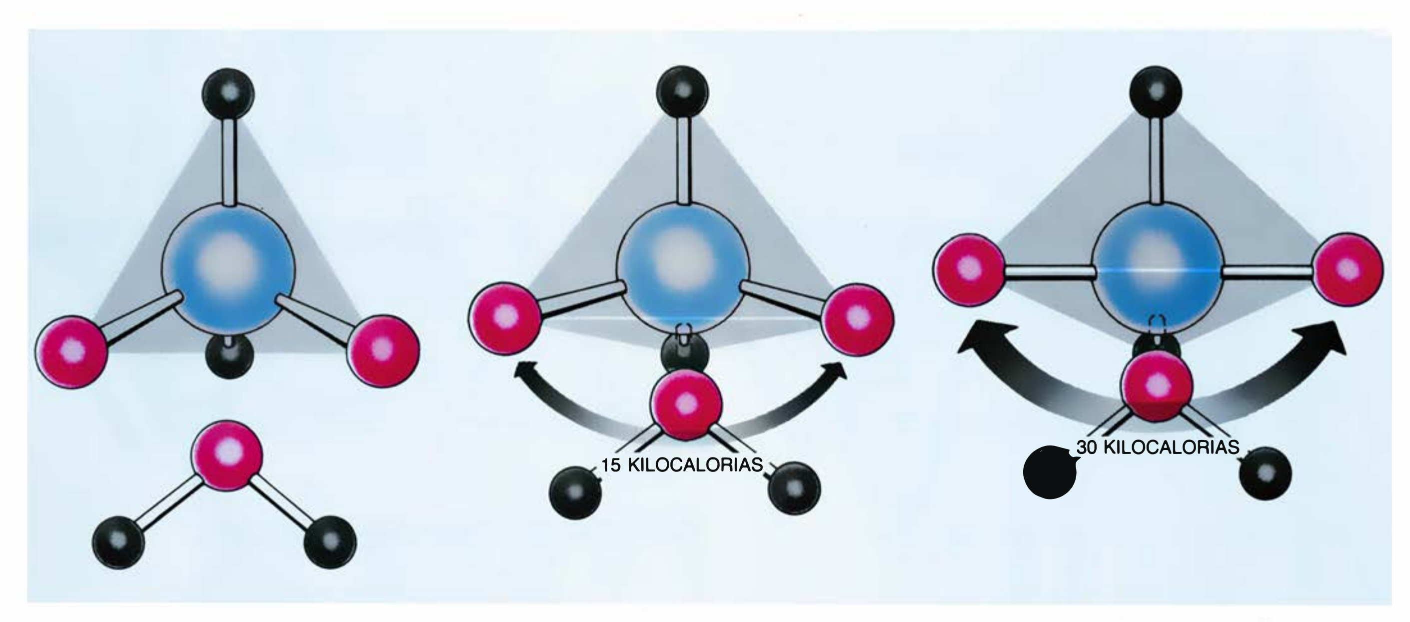
óptica para barrer rápidamente el espectro entero de frecuencias. El barrido comprende todas las frecuencias de radiación infrarroja; así, el tiempo necesario para recoger los datos interesantes es sólo de una fracción de segundo, mientras que la espectroscopía de infrarrojos tradicional requiere una media hora para obtener un espectro completo. Las distintas frecuencias se separan a continuación mediante el recurso matemático del análisis de Fourier. La ventaja obtenida por la transformada de Fourier de espectroscopía de infrarrojos es obvia: cuando se estudian reacciones químicas rápidas, se precisan mediciones rápidas y exactas del cambio, en función del tiempo, de las cantidades de reactantes, los productos intermedios de reacción y los productos finales.

La transformada de Fourier de espectroscopía de infrarrojos permite seguir la cinética de las reacciones entre los productos químicos que desempeñan un papel importante en la fractura del vidrio. Podemos distinguir entre los anillos de aristas compartidas (reactantes), las moléculas de agua adsorbidas en los anillos (productos intermedios de reacción) y los grupos de hidróxido de silicio (productos finales). Nuestro trabajo nos ha llevado a tres descubrimientos de interés. Primero, es mucho más probable que un átomo de silicio acepte electrones de un anillo deformado que lo haga un átomo de silicio de un vidrio sin tensiones. En consecuencia, el átomo de silicio de un anillo en tensión puede adsorber con mayor probabilidad moléculas donantes de electrones, como las de agua, amoníaco y metanol. Segundo, todas las especies químicas que promueven antes el crecimiento de las grietas en vidrio de sílice se quimisorben disociativamente en el anillo deformado: parten uno de los enlaces de silicio-oxígeno distorsionados del anillo. Recíprocamente, los productos químicos que no reaccionan con los anillos de aristas compartidas no intervienen en el crecimiento de la grieta de la sílice.

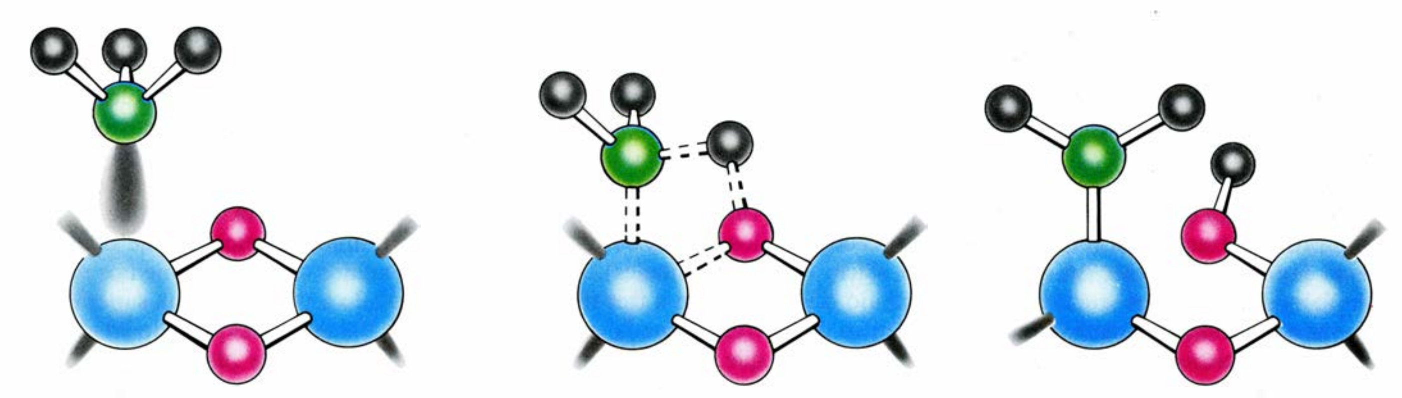
Por último, la velocidad de división de los anillos cuando exponemos nuestro modelo a vapor de agua supera, en más de 100.000 veces, la velocidad a la cual una superficie plana de sílice sin tensiones reacciona con el agua. Los resultados aportan una prueba experimental directa de rotura rápida de los enlaces silicio-oxígeno mediante una reacción, intensificada por la tensión, con agua y otros productos químicos.

Decidimos determinar luego si la quimisorción disociativa entre las moléculas de agua y los enlaces silicio-oxígeno deformados constituía el factor





5. CALCULOS TEORICOS en virtud de los cuales se demuestra que el agua rebaja la energía necesaria para distorsionar la unidad tetraédrica básica del vidrio de sílice. En ausencia de agua, deben consumirse 73 kilocalorías de energía para aumentar el ángulo entre dos átomos de oxígeno, de 105 a 180 grados (*arriba*). En presencia de agua, esta energía es de 30 kilocalorías (*abajo*). Se han sustituido dos de los átomos de oxígeno del tetraedro por átomos de hidrógeno.



6. EXPERIMENTOS que confirman la importancia de las tensiones en la promoción del crecimiento de grietas. Los autores trabajaron con anillos que constaban de dos átomos de oxígeno y dos de silicio. Los anillos de aristas compartidas, así se llaman, sirven para estudiar los efectos de la deformación del enlace, ya que los ángulos de enlace y las distancias entre los átomos se presentan muy distorsionados si los comparamos con los de la sílice normal. Se muestra aquí la reacción entre una molécula de amoníaco y un anillo de aristas compartidas. El amoníaco se adsorbe en un lugar deformado del silicio; una reacción de quimisorción disociativa rompe los enlaces de silicio-oxígeno-silicio. Estos enlaces deformados reaccionan 100.000 veces más rápido que los sin distorsionar.

limitante de la velocidad de crecimiento de las grietas. Comparamos directamente la cinética de las reacciones de división de anillos en el compuesto modelo con la velocidad de crecimiento de grietas, medida en idénticas condiciones ambientales. Descubrimos entonces que el amoníaco se comportaba algo más agresivo que el agua en la ruptura de los enlaces de silicio-oxígeno deformados; vimos también que instaba un crecimiento más rápido de las grietas del vidrio de sílice que cuando éstas lo hacían en medio acuoso. El metanol es, asimismo, más agresivo que el agua en la ruptura de los enlaces de silicio-oxígeno deformados; su eficacia en aumentar la velocidad de crecimiento de las grietas queda a cinco órdenes de magnitud por debajo de la mostrada por el agua o el amoníaco. La comparación entre las reacciones de nuestro compuesto modelo en el metanol y las medidas de crecimiento de

950 940 930 920 910 900 890 880 870
NUMEROS DE ONDA
TIEMPO (MINUTOS)
0 1 2 3
3,100 3,050 3,000 2,950 2,900 2,850 2,800
NUMEROS DE ONDA
TIEMPO (MINUTOS)
0 1 2 3

7. TRANSFORMADA DE FOURIER de espectroscopia de infrarrojos. A ese procedimiento se recurre para medir las velocidades a las que reaccionan diversos productos químicos con los anillos de silicatos de aristas compartidas. Los dibujos nos ilustran un ejemplo de una reacción que incluye metanol. Las velocidades a las que desaparecen los anillos (*izquierda*) y aparece el metanol quimisorbido (*derecha*) se observan exponiendo las muestras a radiación infrarroja. Cuando la frecuencia de la radiación coincide con una vibración característica de cada molécula, se registra gran absorción (*máximos de las curvas*).

las grietas indica, sin lugar para la duda, que la cinética de la fractura no puede predecirse basándose únicamente en la cinética de las reacciones implicadas en la ruptura de los enlaces.

¿Dónde reside la causa del comportamiento insólito del metanol? Lo dijimos antes, el tamaño de la molécula que ataca al vidrio determina también su capacidad para promover el crecimiento de la grieta. El agua y el amoníaco tienen tamaños moleculares casi idénticos (0,26 nanómetros); el metanol es mucho mayor (0,36 nanómetros). Las moléculas pequeñas, como el agua o el amoníaco, entran perfectamente en la grieta (que tiene un diámetro de 0,4 a 0,5 nanómetros) y desencadenan reacciones que rompen enlaces; pero las moléculas mayores, como la del metanol, tienen dificultades para entrar. En este sentido, hemos visto que las moléculas de tamaño superior a los 0,4 nanómetros no ejercen ningún efecto medible sobre el crecimiento de las grietas; presentan incluso una probabilidad pequeñísima de hacerlo en zonas donde se producen las reacciones de ruptura del enlace. El tamaño de la molécula reactiva puede influir en las velocidades de la grieta, aun cuando la molécula sea menor que la apertura del extremo de la grieta. En efecto, la región que se halla justo detrás de esa zona actúa de tamiz, que va dejando pasar moléculas hacia el extremo a una velocidad determinada por el tamaño de la molécula.

Un efecto similar se observa en los tamices moleculares de zeolitas; así se llaman ciertos cristales alúmino-silicatados que contienen estructuras bien definidas, que se conectan por aperturas de un tamaño conocido. Se emplean para separar diferentes productos químicos en razón del tamaño; las moléculas mayores quedan excluidas, mientras que las menores atraviesan las aperturas y se adsorben dentro de las cavidades. Recurrimos a las tasas de difusión molecular medidas en las zeolitas y las convertimos en modelo para la apertura del extremo de la grieta; ello nos permitió demostrar que el metanol debería difundirse en el extremo de una grieta a una velocidad cuatro órdenes de magnitud menor que la del agua. Teniendo en cuenta la tasa de difusión molecular cerca del extremo de la grieta y la velocidad de las reacciones químicas disociativas en el enlace silicio-oxígeno deformado, podemos predecir, dentro de un orden de magnitud, las velocidades relativas de crecimiento de las grietas en el vidrio de sílice cuando se le expone a diferentes productos químicos.

Los resultados de tales estudios atómicos de la fractura sugieren varias posibilidades, nuevas e interesantes, para predecir y controlar la resistencia del vidrio y otros materiales frágiles. Nuestro descubrimiento de la importancia de la difusión molecular cerca del extremo de la grieta indica que pueden diseñarse revestimientos superficiales para bloquear la apertura de las grietas y restringir el paso de moléculas pequeñas, como el agua, que pueden atacar los enlaces del extremo de la grieta y debilitar químicamente el vidrio. Estamos investigando esta posibilidad; y, con ese propósito, unimos moléculas grandes a las paredes de la grieta y medimos el efecto que ello ejerce sobre la velocidad del subsiguiente crecimiento de la grieta en presencia del agua. Hemos encontrado ya que esta velocidad de crecimiento puede disminuir unas 1000 veces cuando se aplica a la grieta el revestimiento molecular. Si se pudiera aplicar comercialmente, se alargaría muchísimo el tiempo de vida estructural del vidrio y sus derivados.

Lo mismo cabría afirmar para las cerámicas. Nuestro trabajo sobre el crecimiento de grietas en otros sólidos nos lleva a creer que las conclusiones generales extraídas para la sílice explicarían el comportamiento resistente de múltiples materiales frágiles. Las reacciones reales del extremo de la grieta parecen, sin embargo, variar de un material a otro; la química de cada sólido merece su propia y distinta consideración. En los vidrios complejos de silicatos, por ejemplo, el mecanismo de ruptura de enlaces para la propagación de grietas, muy sencillo, puede complicarse con la formación de capas de reacción que tienen un espesor de varios micrometros. Aunque estas capas no intervienen de una manera directa en el proceso de ruptura de enlaces, sí pueden alterar la cuantía de la tensión concentrada en la grieta.

E importa tener en cuenta que, si bien la relación entre las reacciones químicas de superficie y la resistencia mecánica puede ser más compleja que las interacciones descritas en este artículo, el conocimiento cabal de la rotura de los vidrios constituye el fundamento para predecir cómo y cuando se fracturarán otros materiales. Quizá nos oriente incluso en la predicción del más sobrecogedor de los episodios de fractura: los terremotos.

Juegos de ordenador

Sencillos efectos especiales que ilustran el arte de convertir algoritmos en programas

A. K. Dewdney

Los efectos especiales no siempre exigen el equipamiento técnico y los recursos financieros de que disponen los grandes estudios cinematográficos. Los urdidores de fantasías pueden ahora generar en sus ordenadores domésticos fenómenos, un tanto limitados quizá, pero sorprendentes, merced a lo que podríamos llamar programas de efectos especiales. Imaginemos, por ejemplo, que por nuestra pantalla deban ponerse súbitamente a reptar gusanos, avanzando con vivacidad entre contorsiones. Un programa de efectos especiales nos proporcionaría esa visión. ¿Y si la pantalla hubiera de licuarse inesperadamente? Al caer en ella, las gotas de lluvia generarían aros concéntricos de rizos circulares en expansión infinita hacia el exterior. También ese efecto especial se resuelve fácilmente. Supongamos por último que la pantalla se convierta en una claraboya abierta a un universo de estrellas que hacen explosión, o que fluyen raudas a nuestro lado y pasan de largo. Podríamos en tal caso encontrarnos a bordo de una nave espacial que volara lanzada a través de un corredor de estrellas. Un tercer programa produce económicamente tal ilusión.

A mi juicio, la economía de medios constituye una de las características más destacadas de estos programas; ante un efecto sorprendente, tanto mejor si el programa que lo genera es de una brevedad estupefaciente. ¿Qué otro vehículo más idóneo para introducir a los lectores en el universo, mucho más amplio, de ideas y apariencias que yace tras la pantalla del monitor? En particular, y a juzgar por un pequeño pero persistente porcentaje de la correspondencia que recibo, algunos neófitos contemplan desconsolados las páginas de esta sección, impotentes para convertir en programas ejecutables los algoritmos presentados. Se alinean en las aceras a contemplar el desfile de los conjuntos de Mandelbrot, de los trastocadores de palabras, los tuercecaras, las sopas primordiales y los cúmulos estelares. Mal pueden, así, imaginar el placer de observar cómo un algoritmo cobra carne y hueso y se convierte en programa.

Pensando, pues, en tales lectores, no me limitaré este mes a describir cómo podrían lograrse los efectos especiales anteriores. Esta vez voy a explicar el mecanismo de la transformación de un algoritmo en programa; voy, por así decirlo, a explicar dónde van las tuercas y tornillos. Expondré el modo de cubrir de gusanos la pantalla propia, tanto en un lenguaje algorítmico general como en un lenguaje específico de programación, el BASIC. Mostraré, además, cómo construir el algoritmo propiamente dicho y daré un ejemplo del arte de la conversión de algoritmos en programas, con la intención de que sirva de vía de ingreso a los artículos del pasado y los del porvenir. Tal vez los neófitos experimenten así una suerte de conversión.

¿Qué protocomputadicto será capaz de vencer la tentación de escribir un programa que genere vivaces anélidos electrónicos? Nuestras ilusiones pierden cierta altura al advertir que los gusanos no son otra cosa que ristras de circulitos. Pero al programar un efecto especial (y puestos a eso, cualquier cosa), es preciso dejar temporalmente de lado las ilusiones y cargar el acento en el análisis. ¿Cómo se desplaza el gusano? Añadiendo un nuevo circulito en la cabeza y eliminando el último de la cola. El efecto de movimiento resultante —el de que una criatura entera se desliza por la pantalla— no es más que una ilusión, pero lleva a buen puerto la tarea.

El programa que he llamado GUSANOS comenzó a hacer eclosión la primera vez que ví el citado efecto en mi nuevo ordenador SUN. Alguien había añadido ese reclamo al menú básico de programas de sistema y de utilidad que suelen habitar las máquinas recién entregadas. Quien lo hiciera posiblemente juzgó que la visión de gusanos retorciéndose por la pantalla haría que al comprador le pareciera justificado el gasto efectuado en la adquisición de la máquina.

El programa hizo verdadera eclosión cuando empecé a preguntarme de qué modo podría lograrse el efecto de gusano reptando. Al inspeccionar la pantalla de cerca advertí más o menos inmediatamente que la sensación de movimiento se lograba trazando un nuevo círculo en la cabeza del gusano y borrando de la cola uno de los viejos. "¡Ajá!", me dije a mí mismo. "¡Fácil!", y visualicé por un instante un programa muy breve, hasta que caí en la cuenta de que un programa capaz de borrar un círculo dibujado anteriormente tendría primero que recordar dónde se encuentra tal círculo. Y puesto que tarde o temprano hay que borrar todos los círculos del gusano, sería preciso guardar recuerdo de cada uno de ellos.

Las tablas (conocidas también por matrices y variables dimensionales) constituyen una de las más sencillas estructuras de datos utilizadas para recordar un gran número de elementos de igual naturaleza. Pensé, en consecuencia, de qué forma podría almacenar los círculos en una tabla. Sea cual fuere el lenguaje de programación que se utilice, es casi seguro que el mandato gráfico necesario para dibujar una circunferencia (o para borrarla, dibujándola del color de fondo de la pantalla) se valdrá normalmente de las dos coordenadas del centro y del radio. El radio de las circunferencias que compondrían mi gusano sería constante, pero sus centros habrían de cambiar en las circunferencias sucesivas. Así pues, bastaría almacenar las coordenadas de los centros. Y dado que una y otra coordenadas serían números diferentes, convendría almacenarlos no en una tabla, sino en dos. Decidí que éstas se llamasen *xcir* e *ycir*. Por consiguiente, *xcir*(*i*) sería la abscisa del centro de la *i*ésima circunferencia e *ycir*(*i*) sería su *i*ésima ordenada.

Las dos tablas resultantes plantearon una de las principales dificultades del programa GUSANOS. Aunque fuera borrando las viejas, el programa tendría que añadir nuevas circunferencias a la tabla. Lo mismo que un gusano, las propias tablas constituirían una cadena de círculos. Pero las tablas no iban a moverse por la pantalla. Antes bien, una variable especial, a modo de puntero, habría de señalar cuál de las posiciones de la tabla era la que en ese momento contenía la última circunferencia de la cola de la criatura. Tanto

en matemáticas como en ciencias de cómputo, la sencilla acción de dar nombre a algo nos confiere sobre ello un mágico poder. Al darle al puntero el nombre de *cola* dispuse inmediatamente de una de las sentencias clave de GUSANOS:

$$cola \leftarrow cola + 1$$

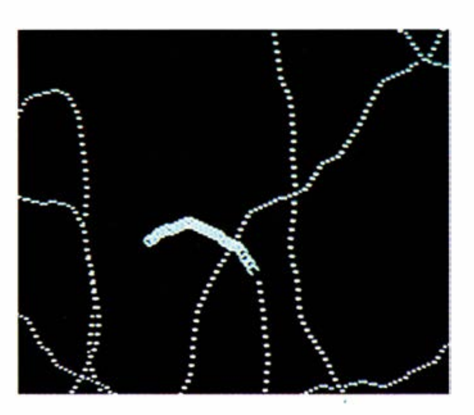
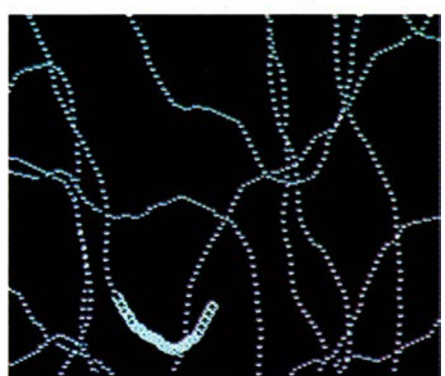
Dicho con otras palabras, en cada uno de los ciclos principales de funcionamiento del programa, el puntero indicador de *cola* avanzaría una posición a lo largo de las tablas.

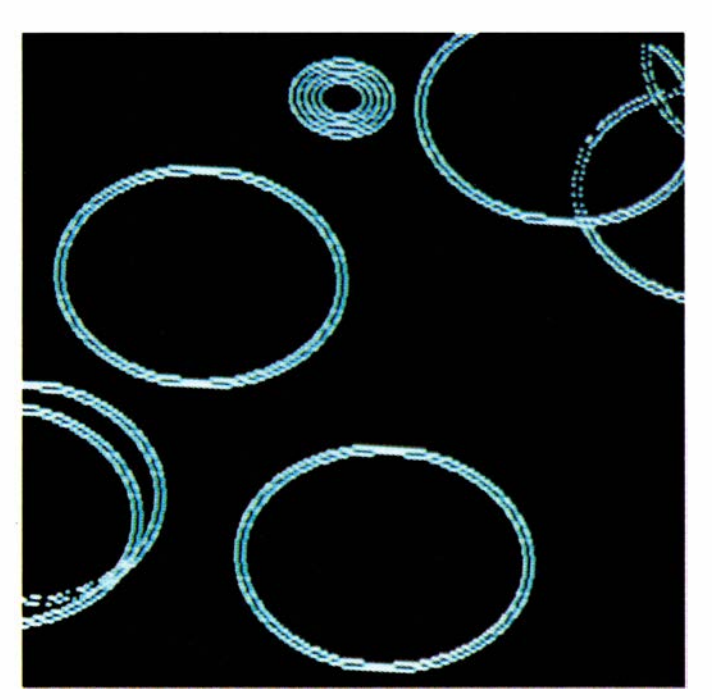
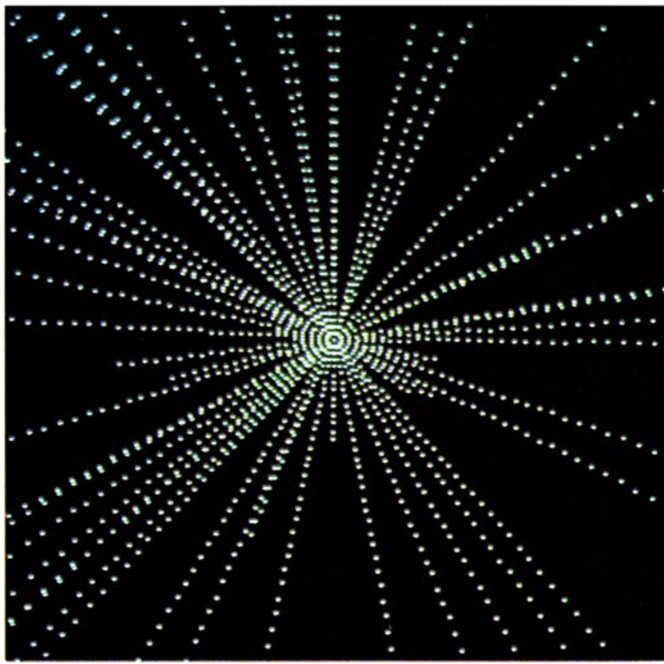
Por ejemplo, si en el momento presente *cola* fuera igual a 7, la última circunferencia del gusano tendría su centro en las coordenadas *xcir*(7),*ycir*(7). Al ejecutar la sentencia de asignación mostrada sobre estas líneas, el nuevo valor de *cola* sería 8. En el ínterin habría que dibujar una nueva circunferencia de cabeza y anotar sus coordenadas en las tablas *xcir* e *ycir*. El lugar lógico para guardar tales coordenadas es la posición que en el presente ocupen las coordenadas de la vieja cola, a saber, la posición 7.

En este punto no tenía yo la menor idea de dónde decidiría el programa dibujar sobre la pantalla las nuevas circunferencias de cabeza; tal asunto era cuestión totalmente independiente que estudiaría más adelante. Una de las dificultades que se presentan con mayor frecuencia al diseñar programas nace de la confusión producida al mezclarse en la mente las diversas exigencias computacionales. *Divide et impera*.

Antes incluso de esbozar en papel el algoritmo correspondiente a GUSANOS tenía ya la idea de crear dos tablas que contuvieran la totalidad de las circunferencias que en cada instante figuraban en un gusano dado. El puntero *cola* avanzaría a lo largo de cada tabla, remplazando las coordenadas del antiguo círculo de *cola* por las de una circunferencia de cabeza. ¿Qué ocurriría, sin embargo, cuando *cola* llegase al final de la tabla? Tendría que saltar y retornar al principio, utilizando, evidentemente, aritmética modular. Por ejemplo, si el gusano estuviera compuesto por 10 circunferencias y el viejo valor de *cola* fuera 9, el nuevo valor de *cola* sería 0. He aquí el aspecto del algoritmo al llegar a este punto:

bucle
  cola ← *cola* + 1 (módulo algo)
  obtención de las nuevas coordenadas
      de la cabeza
  inserción de las mismas en *xcir*(*cola*)
      e *ycir*(*cola*)
  dibujo de la nueva cabeza
  borrado de la cola
fin del bucle

1. *Un gusano que deja rastro (***arriba***); lluvia (***abajo, a la izquierda***) y explosión estelar (***abajo, a la derecha***)*

La verdadera utilidad de la técnica algorítmica en el diseño y especificación de programas de ordenador reside en la maravillosa vaguedad y versatilidad de su lenguaje. El diseñador puede decir lo que le plazca en cualquier punto del algoritmo, con tal de que su enunciado tenga un significado potencial que luego adquiera mayor consistencia y formalidad. Por ejemplo, yo había pospuesto la cuestión de determinar exactamente cómo obtendría el programa las nuevas coordenadas de la cabeza por el sencillo expediente de escribir "obtención de las nuevas coordenadas de la cabeza". En un algoritmo más detallado, este enunciado tendría un desarrollo de varias líneas. Pero incluso con ese burdo nivel de detalle, descubrí que el algoritmo proporcionaba inmediatamente una visión más clara de cómo debía estructurarse el programa. Incluso descubrí un error: ¿cómo podría el programa "borrar la cola", si no sabía dónde estaba? Dentro del bucle, un poco más arriba, las nuevas coordenadas de la cabeza acababan de "machacar" las coordenadas de la cola. Por tanto, el borrado de la circunferencia de cola debería hacerse en el bucle, a saber, antes de efectuar la sustitución de coordenadas. Corregí el algoritmo en consecuencia. Los principiantes podrían tratar de corregir por sí mismos el algoritmo antes de proseguir y ver qué hice yo.

Ya era momento de dar un repaso al algoritmo. ¿En qué clase de bucle iba yo a concretar todo aquello? La cuestión me llevó directamente al problema de cómo concluir el movimiento del gusano. El plan más sencillo que se me ocurrió consistía en hacer un número fijo de iteraciones en un bucle "desde... hasta...", en el cual cierto índice va contando despreocupadamente varios millares de iteraciones durante las cuales el gusano irá contorsionándose por la pantalla. Sin embargo, sería preferible concluir la carrera del gusano con la pulsación de una tecla. Por consiguiente, parecía venir al caso un bucle del tipo "repetir... hasta...". El programa ejecutaría repetidamente las instrucciones contenidas en el bucle hasta que un humano pulsase una tecla designada.

Tenía también que decidir qué valor darle al "algo" de la primera instrucción del bucle. El módulo debería tener igual tamaño que la tabla. Lo cual me llevó directamente a la cuestión de la longitud del gusano. Decidí arbitrariamente que 25 circunferencias darían un gusano de aspecto francamente activo.

El algoritmo correspondiente a GUSANOS presentaba ahora este aspecto ("mod" denota "módulo"):

repetir
  cola ← *cola* + 1 (mod 25)
  borrar la cola
  determinar las nuevas coordenadas
    de la cabeza
  insertarlas en *xcir*(*cola*) e *ycir*(*cola*)
  dibujar la nueva cabeza
hasta pulsación de una tecla

Refinando más mi algoritmo, remplacé "borrar la cola" por otro enunciado más próximo a la instrucción que me proponía utilizar definitivamente. Dado que quería trazar un círculo negro donde anteriormente había otro claro (mi pantalla tiene fondo oscuro), inserté el enunciado "circunferencia negra en *cir*(*cola*)", lo que significaba trazar una circunferencia oscura con centro en *xcir*(*cola*), *ycir*(*cola*).

Tenía que afrontar ahora el problema de "determinar las nuevas coordenadas de la cabeza". ¿En virtud de qué mecanismo decidiría el programa dónde dibujar la siguiente circunferencia de cabeza? Era evidente que habría de hallarse próxima a la inmediatamente anterior, en algún lugar situado "delante" de la misma. Además, para que los giros y contorsiones del gusano tuvieran aspecto natural, la nueva dirección no debería diferir demasiado de la precedente. La solución consistió en tomar una única variable, llamada *dir*, por dirección, que poseería la orientación actual del gusano, dada en grados. En cada iteración del bucle principal, el programa incrementaría o decrementaría aleatoriamente el valor de *dir* en 10 grados.

Había llegado el momento de decidir la distancia que separaría los círculos y, más todavía, de qué tamaño trazarlos. Un radio de 4 parecía un valor razonable con el que tantear. Dado que el gusano habría de ofrecer un aspecto conexo, los círculos tendrían que solaparse. Remplacé la instrucción "determinar las nuevas coordenadas de la cabeza" por

  cambio ← aleatorio
  si *cambio* < 0,5
    tomar *dir* ← *dir* + 10
    y si no, *dir* ← *dir* − 10
  x ← *xcir*(*cola* − 1)
  y ← *ycir*(*cola* − 1)
  xnueva ← *x* + 4 · coseno(*dir*)
  ynueva ← *y* + 4 · seno(*dir*)

Este fragmento de algoritmo selecciona un número aleatorio llamado cambio. La mayoría de los sistemas de programación proporcionan números aleatorios comprendidos entre 0 y 1. Dado que un número aleatorio comprendido en este intervalo será menor que 0,5 aproximadamente la mitad de las veces, la variable *dir* quedará incrementada más o menos la mitad de las veces. Como es obvio, ello sólo acontecerá a la larga. A la corta, *dir* quedará imprevisiblemente aumentada o decrementada en 10 grados. Las coordenadas *x* e *y* son, sencillamente, las coordenadas de la cabeza dibujada con anterioridad. Los dos últimos enunciados son meros cálculos de matemáticas de bachillerato, que se valen de las funciones trigonométricas elementales seno y coseno para lograr incrementos de *x* e *y* ajustados al valor 4. Se obtienen así las coordenadas de la nueva cabeza.

Me bastaron otros dos pasos más para refinar el algoritmo. Era ya cosa fácil poner las coordenadas de la nueva cabeza en *xcir*(*cola*) e *ycir*(*cola*), pues se trataba de un simple enunciado de asignación. El dibujo de la nueva cabeza suponía una instrucción gráfica similar a la anteriormente utilizada para borrar la cola.

Finalmente, tuve que inicializar las tablas y variables que figuraban al comienzo del algoritmo. Hice aquí igual a 1 la variable "puntero" *cola* y ajusté las coordenadas iniciales *xcir*(1) e *ycir*(1) al valor 100. Se supuso que las restantes entradas de esas tablas se anulaban automáticamente. También a la variable de dirección, *dir*, se le asignó un valor inicial 0. Así pues, el gusano comenzaría a reptar a partir del punto (100,100) apuntando en la dirección 0 grados. El punto (100,100) hace el papel de abreviatura para denotar el centro de la pantalla propia. Las coordenadas del centro pueden variar entre máquinas.

Quedaba un problema pendiente: ¿qué sucedería si, en su reptar, el gusano se salía de la pantalla? Opté por incorporar al programa instrucciones para que el gusano retornase automáticamente. Cualquier valor de *x* o *y* que se saliera del intervalo de valores permisibles para la pantalla quedaría automáticamente convertido en una coordenada del lado opuesto de la misma. En una hipotética pantalla donde las coordenadas fueran de 0 a 199, el cálculo siguiente convertiría toda coordenada situada fuera del intervalo en otra situada dentro de él:

xnueva ← *xnueva* mod 200
ynueva ← *ynueva* mod 200

La práctica totalidad de lenguajes de

programación disponen de la función módulo, que divide el operando (*xnueva*) entre el módulo (200) y calcula el resto. La variable a la que se le asigna el resto (*xnueva*) porta ahora el valor del cálculo modular.

Y basta ya de GUSANOS. ¿O acaso debería haberlo llamado GUSANO? El algoritmo solamente proporciona uno. Para que la s del plural responda a la realidad, los lectores podrían emplear un juego de matrices para cada gusano. En cualquier caso, el algoritmo que acabo de especificar aparece en la figura 2. A su lado se muestra también un programa equivalente redactado en BASIC. Mucho le molestaría a este maestrillo enterarse de que sus lectores se habían conformado con copiar el programa en BASIC en sus máquinas, sin antes absorber las lecciones que tan cuidadosamente se les han expuesto aquí.

Al comparar línea por línea el algoritmo y el programa se pone de manifiesto la estrecha semejanza entre ambos. Tanto es así, que dos de los principales bloques de instrucciones del algoritmo sobrevivieron con pequeñísimos cambios en su traducción a BASIC (IBM PC BASIC versión 3.0). Las principales diferencias giran en torno a la forma concreta que adopta la instrucción de pulsación de tecla en el IBM PC, así como en la inexistencia de bucles "repetir... hasta..." en esta versión de BASIC.

Por lo que toca a las diferencias de la primera categoría, se seleccionó KEY(1) como interruptor con el que el usuario pueda detener el programa cuando se canse de ver al gusanito contorsionarse por la pantalla. [La tecla KEY(1) corresponde a la tecla de función F1 en el teclado del IBM PC.] En la línea 70, el programa activa la tecla, señalando al sistema BASIC subyacente que esté atento a las señales emanadas de la tecla F1. La instrucción KEYOFF de la línea 90 borra las opciones que el BASIC presenta a pie de pantalla, con el fin de que los gusanos dispongan de una pantalla totalmente despejada. No obstante, la principal de las instrucciones relativas a la tecla F1 se presenta en la línea 60. En ella se instruye al sistema para que salte a la línea 290 si el usuario pulsa F1. En esa línea se procede a limpiar la pantalla y la ejecución se detiene al llegar a la sentencia END.

En lo tocante a las diferencias de la segunda categoría, la carencia de bucles del tipo "repetir..." obligó a construir una forma equivalente de control de ejecución mediante el mandato GOTO situado en la línea 280 del programa, que obliga a proseguir la ejecución del programa en la línea 110 hasta que alguien pulse la tecla F1. La posición del bucle resultante está señalada por dos comentarios, situado el uno en la línea 100 y el otro en la línea 270, insertados con la intención de destacar a los lectores la estructura de bucle pretendida.

La redacción de GUSANOS en BASIC provocó otras diferencias. La sentencia 10 establece que la dimensión de las tablas será de 25 entradas cada una. La sentencia 80 establece que el IBM PC ha de pasar a la modalidad de pantalla de alta resolución, en la cual los puntos están lo más próximos posible. Una nueva variable introducida en la línea 110, *eracola*, toma el valor de *cola* justamente antes de que esta última sea decrementada. Así, *eracola* puede remplazar en el algoritmo a *cola* − 1 en el momento de calcular *x* e *y*. Sin embargo, la razón principal de utilizar *eracola* es que *cola* es el índice de una tabla y, en esta versión de BASIC, los índices de tablas no pueden tomar el valor 0. Consiguientemente, en la línea 120 se procede a sumar el 1 después de tomar el módulo, y no antes. En el algoritmo

```
xcir(1) ← 100
ycir(1) ← 100
dir ← 0
cola ← 1
repetir
    cola ← (cola + 1) mod 25
    circunferencia negra en cir(cola)
    cambio ← aleatorio
    si cambio < 0,5
       entonces dir ← dir + 10
       y si no, dir ← dir − 10
    x ← xcir(cola − 1)
    y ← ycir(cola − 1)
    xnueva ← x + 4 · coseno(dir)
    ynueva ← y + 4 · seno(dir)
    xnueva ← (xnueva + 100) mod 200 − 100
    ynueva ← (ynueva + 100) mod 200 − 100
    xcir(cola) ← xnueva
    ycir(cola) ← ynueva
    dibujar circunferencia blanca en
       (xnueva,ynueva)
ul hasta la pulsación de alguna tecla
```

```
 10 DIM XCIR(25),YCIR(25)
 20 XCIR(1) = 100
 30 YCIR(1) = 100
 40 DIR = 0
 50 COLA = 1
 60 ON KEY(1) GOSUB 290
 70 KEY(1) ON
 80 SCREEN 2
 90 KEY OFF
100 'repetir
110  ERACOLA = COLA
120  COLA = (COLA MOD 25) + 1
130  CIRCLE(XCIR(COLA),YCIR(COLA)),4,0
140  CAMBIO = RND
150  IF CAMBIO < .5 THEN DIR = DIR + .1745 ELSE DIR = DIR − .1745
160  X = XCIR(ERACOLA)
170  Y = YCIR(ERACOLA)
180  XNUEVA = X + 4 * COS(DIR)
190  YNUEVA = Y + 4 * SIN(DIR)
200  XNUEVA = XNUEVA MOD 600
210  YNUEVA = YNUEVA MOD 200
220  IF XNUEVA < 0 THEN XNUEVA = XNUEVA + 600
230  IF YNUEVA < 0 THEN YNUEVA = YNUEVA + 200
240  XCIR(COLA) = XNUEVA
250  YCIR(COLA) = YNUEVA
260  CIRCLE(XNUEVA,YNUEVA),4,1
270 'hasta pulsación de la tecla
280 GOTO 110
290 SCREEN 0
300 END
```

2. Conversión a BASIC del algoritmo correspondiente a GUSANOS

había sido un tanto descuidado, pues imaginaba que el índice *cola* recorrería los valores de 0 a 24. La verdadera instrucción de dibujo de la circunferencia correspondiente al BASIC del IBM PC aparece en la línea 130. El centro de la circunferencia se encuentra en las coordenadas *xcir*(*cola*),*ycir*(*cola*); el radio es 4 y el color es 0 (negro).

En la línea 150 la variable *dir* no se incrementa en 10 grados, sino en su equivalente, más o menos aproximado, de 0,1745 radianes. (El BASIC del IBM PC no utiliza grados.) En las líneas 200 y 210 las variables *xnueva* e *ynueva* ven limitados sus valores a 600 y 200, respectivamente. Estos valores definen un recuadro que encaja justamente dentro de la pantalla del monitor del IBM PC. La función "módulo" del BASIC opera pulcramente sobre números positivos, pero no funciona sobre los negativos. Por tanto, cuando un gusano se sale de la pantalla en dirección negativa, para tomar el módulo se suman a sus coordenadas las dimensiones adecuadas de la pantalla, como se hace en las líneas 220 y 230. Cuando un gusano se escape reptando por uno de los lados del recuadro, reaparecerá por el otro lado. En la línea 290, el mandato SCREEN 0 repone la pantalla a la modalidad de texto, dejándola lista para cualesquiera mensajes posteriores.

Los amantes de los GUSANOS pueden mejorar sus programas insertando un mandato RANDOMIZE antes de que comience el bucle; ello impide que el gusano repase sus propias huellas. Pueden, si así lo desean, añadir previsiones para reinicializar el programa, o un pequeño rastro de puntitos, como hemos hecho en el que mostramos en lo alto de la figura 1.

De bastar las indicaciones siguientes, es probable que incluso los neófitos logren programar los restantes efectos especiales mencionados al principio.

El programa que llamo LLUVIA selecciona al azar un punto de la pantalla y traza en torno a él una sucesión de circunferencias de radios siempre crecientes. A continuación, el programa selecciona otro punto y repite el procedimiento de trazado. LLUVIA prosigue de igual modo hasta que el "hombre del tiempo" pulsa una tecla. Hay, por consiguiente, dos bucles: uno exterior, en el cual se procede a seleccionar el punto, y un bucle interior, en el cual se trazan los círculos que lo contornean. LLUVIA convierte en coordenadas de pantalla dos valores aleatorios comprendidos entre 0 y 1, por el procedimiento de multiplicarlos por las respectivas dimensiones de la pantalla. El punto resultante (x,y) pasa a ser el centro de una sucesión de circunferencias cuyo trazado corre a cargo del bucle interior. Dejemos correr un índice k desde 1 hasta 25 mientras van dibujándose circunferencias blancas (o de color claro). Los centros se encuentran en los puntos (x,y) y los radios van tomando los valores $4k$. Resulta más sencillo dejar sobre la pantalla todos los círculos así dibujados. Pero también es más realista dejar que una sola, o unas pocas circunferencias, vayan expandiéndose hacia el exterior. Para producir solamente una, LLUVIA tiene que borrar (esto es, redibujar en negro) la de radio $4(k-1)$ una vez dibujada la de radio $4k$.

NOVA muestra una explosión estelar. Resulta igualmente posible imaginar que se trata de un viaje a través de un vasto pasillo de estrellas que pasan de largo a hipervelocidad junto a la nave en que está instalada nuestra butaca. Las estrellas se mueven a razón de pequeños incrementos a lo largo de líneas de fuga hacia el espectador. Los propios incrementos crecen conforme se aproximan las estrellas. Los objetos más cercanos parecen avanzar más deprisa que los alejados. Sin embargo, NOVA es más complicado que LLUVIA, pues tiene que seguirle la pista a la totalidad de las estrellas visibles. Los lectores pueden utilizar a tal objeto una tabla llamada estrellas, o más correctamente, dos tablas, lo mismo que en GUSANOS, pues han de almacenar las cordenadas x e y de cada estrella. Las coordenadas z quedan implícitas en el movimiento aparente de las estrellas.

Cuando aparece por primera vez una estrella en el origen (100,100), los movimientos estelares son al principio muy pequeños. Los incrementos van haciéndose constantemente mayores conforme se van aproximando las estrellas al observador (o viceversa), y van aumentando en una magnitud que es inversamente proporcional a z, esto es, a su hipotética distancia al observador. Los programadores pueden proyectar, pongamos por caso, unos 25 incrementos por estrella antes de que pase, fulgurante, a nuestro lado. La distancia z a una estrella dada puede tomarse, pues, igual a $25k$, siendo k el número de iteraciones llevadas a cabo en la historia de la estrella.

El bucle grande correspondiente a NOVA supone la creación de una estrella nueva, la destrucción de una de las viejas y el incremento correspondiente a cada una de las estrellas recogidas en las tablas.

Taller y laboratorio

Cómo captar en una película la pálida luminiscencia que emite una cinta adhesiva cuando la despegamos

Jearl Walter

Cuando se arranca de una superficie una cinta adhesiva, produce una tenue luminiscencia azul o azul-blanca a lo largo de la zona por donde se separa de la superficie. Ese resplandor se debe a una gran cantidad de minúsculas chispas que saltan entre la superficie y la cinta, o de un punto a otro de la misma cinta. Para apreciar esa luz, hay que adaptar la vista a la oscuridad durante por lo menos 10 minutos. Se tira luego de la cinta, separándola de una hoja de vidrio que mantendremos cerca de los ojos, mientras fijamos la atención en la zona de separación entre la cinta y el substrato.

¿Qué es lo que ocurre? Durante el primer minuto que transcurre tras haber pegado la cinta al vidrio, hubo electrones que, impulsados por fuerzas eléctricas, cruzaron la separación: unos hacia el vidrio y otros hacia el adhesivo. Esta migración, llamada carga por contacto, deja la separación llena de parches cargados eléctricamente. Algunos de éstos adquirieron electrones en abundancia y se cargaron negativamente; otros perdieron electrones y se cargaron positivamente.

Al arrancar la cinta, estiramos, deformamos y fracturamos la sustancia adhesiva por la zona de separación. Cuando el adhesivo se desprende del vidrio y el aire llena el espacio de la ruptura, se distancian los parches de carga de ambas superficies. Cuando la separación llega a cierto valor crítico, saltan chispas por el aire; a través de éstas se intercambian partículas cargadas entre parches de cargas opuestas y se restablece, en cierta medida, la neutralidad eléctrica.

En su camino, las partículas chocan contra las moléculas gaseosas del aire y las dejan en estados energéticos excitados. Estas moléculas regresan rápidamente a sus estados no excitados emitiendo luz, parte de la cual es visible. La mayor parte de la luminiscencia azul que se percibe así se debe a las moléculas del nitrógeno del aire, que emiten luz en el extremo azul del espectro visible. Una luz adicional puede emitirse en la superficie del vidrio o de la cinta cuando inciden en ellas los chorros de partículas, y hay aún otros procesos que pueden asimismo generar luz. Todas esas emisiones son breves, pero la luminiscencia parece continua si seguimos arrancando la cinta y creamos nuevos parches de carga y más descargas.

La luminiscencia es tan pálida que resulta difícil fotografiarla con procedimientos normales, pero Tom Dickinson y Ed Donaldson, de la Universidad estatal de Washington, han ideado un ingenioso procedimiento para registrarla en película fotográfica. Se trata de trabajar en una habitación oscura y arrancar la cinta directamente de la película, o bien de una lámina transparente que se haya colocado sobre la misma. Así, cuando la película intercepte parte de la luz emitida por una chipa, se grabará una imagen en su emulsión. Luego, tras el revelado aparecerá en la película el registro de la luz emitida durante el proceso de separación. A este registro, Dickinson y Donaldson lo llaman «autógrafo» de la separación. Estos experimentos forman parte de sus investigaciones relativas a los problemas de fractura en adhesivos, materiales compuestos y cerámicas.

A veces, el mecanismo de separación genera una figura singular de franjas claras y oscuras. En otros casos, produce imágenes de chispas brillantes y aisladas. El modo en que se desarrolla la separación depende parcialmente del tipo de superficie a la que esté unida la cinta. Pueden ensayarse con superficies de muy distinta índole; mas para impresionar películas sólo sirven las transparentes. Nos vale un portaobjetos de microscopio, pero da unas imágenes borrosas porque es lo bastante grueso para que la luz procedente de las chispas se difunda antes de llegar a la película.

Dickinson y Donaldson han estudiado la luminiscencia de dos cintas 3M, una transparente (n.º 810) y otra fibrosa (n.º 893). En la transparente, el adhesivo es de alquil-acrilato y, de acetato de celulosa, el soporte. En la fibrosa, el adhesivo es goma natural combinada con un agente «pegajoso»; la cara adhesiva de la cinta presenta este agente en mayor proporción que la interior, donde las fibras de vidrio están ligadas al soporte de poliéster.

Las películas, todas de la marca Polaroid, se eligieron por su amplia variedad de emulsiones y de sensibilidad a la luz. Las de tipo 146 tienen una sensibilidad de 200 ASA y no están cubiertas. Las de los tipos 47 y 107C, con sensibilidad de 3000, se hallan cubiertas de gelatina. La sensibilidad de las de tipo 612 es de 20.000 y la composición de la emulsión es información patentada.

Las películas se cargaban por la parte posterior abierta de las correspondientes cámaras Polaroid, con la cara de la emulsión expuesta a la experimentación. Con las luces de la habitación encendidas, la película cargada se protegía mediante una tarjeta negra opaca. Con las luces apagadas y retirada la tarjeta, se comprimía con los dedos la cinta contra la película. Transcurridos algunos segundos se arrancaba la cinta y se aplicaba otra a una parte distinta de la película. Tras aplicar y arrancar dos o tres cintas, se revelaba la película por el procedimiento habitual de ponerla en contacto con una sustancia de revelado. Dickinson y Donaldson se preguntaban si algún residuo que dejara la cinta en la película podría crear algún efecto artificial en las imágenes finales, pero no encontraron prueba alguna de que ningún residuo interfiriese el revelado de la película o su sensibilidad a la luz.

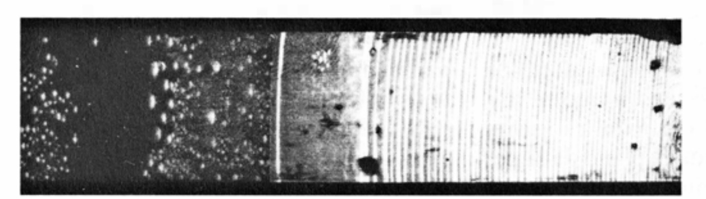
La cinta que se separa directamente de la película deja unas imágenes; pero, ¿se deben éstas a la luz visible producida por las chispas? ¿O se crean cuando las partículas inciden en la emulsión, o, tal vez por acción de sustancias químicas procedentes de la cinta, o acaso por la luz ultravioleta generada por las chispas? Para comprobar esas posibilidades, arrancaron la cinta adherida a un portaobjetos de vidrio colocado sobre la película. Dicho ensayo con el portaobjetos se realizó porque éste no deja pasar ni partículas ni sustancias químicas y absorbe la luz ultravioleta. Las imágenes que se formaron bajo el portaobjetos se compararon entonces con las producidas cuando arrancaron la cinta directamente de la película. Ambos conjuntos de imágenes difirieron tan sólo en la nitidez (puesto que el portaobjetos difun-

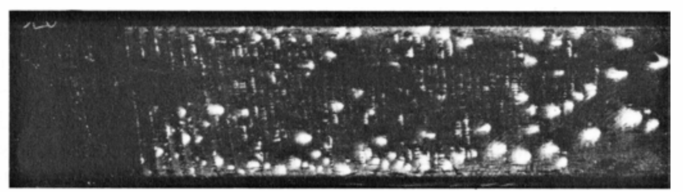
de la luz), lo que indica que la luz visible procedente de las chispas tiene que ser el único origen importante de las imágenes que aparecen en la película.

Tras estos primeros tanteos y a los pocos segundos de haberla aplicado, despegaban directamente la cinta de la película. Para producir los autógrafos de la figura 1, arrancaron cintas transparentes y fibrosas de una película del tipo 146, tirando de izquierda a derecha con una velocidad de separación que se aceleraba aproximadamente desde un milímetro por segundo hasta unos cinco milímetros por segundo. En ambos casos, tiraban de la cinta perpendicularmente al plano de la película. El autógrafo está en parte rayado y el resto presenta un conjunto de imágenes distintas que se deben aparentemente a unos rápidos e intensos estallidos luminosos que hacen que el autógrafo se asemeje a una reunión de luciérnagas. Observada bajo ampliación, la estructura de alguna de las imágenes sugiere que se deben a chispas que destellaron paralelamente a la superficie de la película.

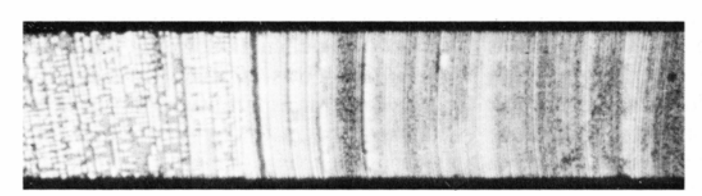
En el caso de la cinta transparente, las rayas son más acusadas cuanto mayor es la velocidad de separación, mientras que, en la fibrosa, una velocidad más lenta produce mejores resultados. Las rayas se deben a las variaciones periódicas en la celeridad con que las cintas se separan de la película. Tales variaciones son parecidas a las secuencias de «adherencia-deslizamiento» que se observan cuando se desliza una superficie sobre otra. Durante la fase de adherencia de las cintas, la separación, lenta, produce unas chispas escasas y débiles que apenas impresionan la película. Las chispas dejan una raya pálida (aunque no totalmente oscura) en el autógrafo revelado. Durante la fase de deslizamiento la separación, rápida, genera chispas intensas y luminosas, que imprimen rayas claras de uno a otro lado de la película. Las zonas claras y oscuras son, ambas, líneas que cruzan en toda su anchura la separación cinta-película, dado que la adherencia y el deslizamiento someten toda esa anchura a su acción; y lo hacen de manera uniforme.

Los detalles más nítidos de las figuras se deben a chispas cercanas o contiguas a la emulsión, ya que la luz procedente de tales chispas no tuvo posibilidad de difundirse. Los detalles más difusos se produjeron probablemente por chispas más alejadas de la emulsión, generadas quizás en la superficie de la cinta, tras haberse separado ésta de la película. Los círculos oscuros que aparecen en uno de los autógrafos se deben a burbujas de aire que quedaron atrapadas bajo la cinta cuando ésta se aplicó a la película; en la zona de estas burbujas no se crean parches cargados, pues ahí la cinta no se halla en contacto con la película. Los defectos en la cara engomada de la película originan, asi-

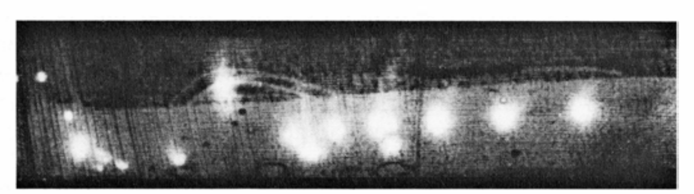




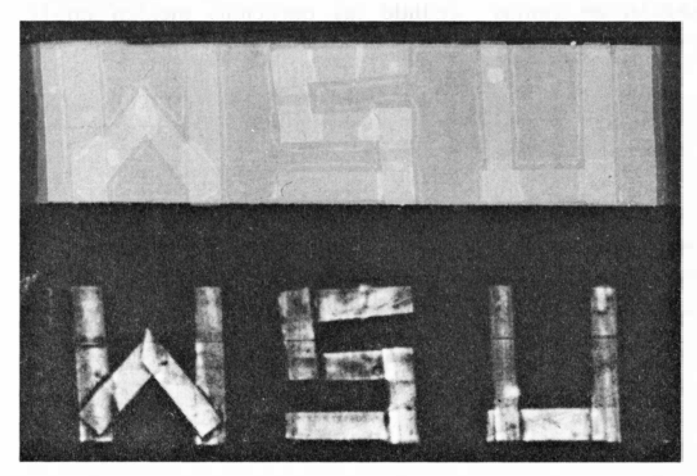
1. Autógrafos dejados por una cinta adhesiva transparente **(izquierda)** *y una cinta adhesiva fibrosa* **(derecha)**, *que se arrancaron a velocidad acelerada*



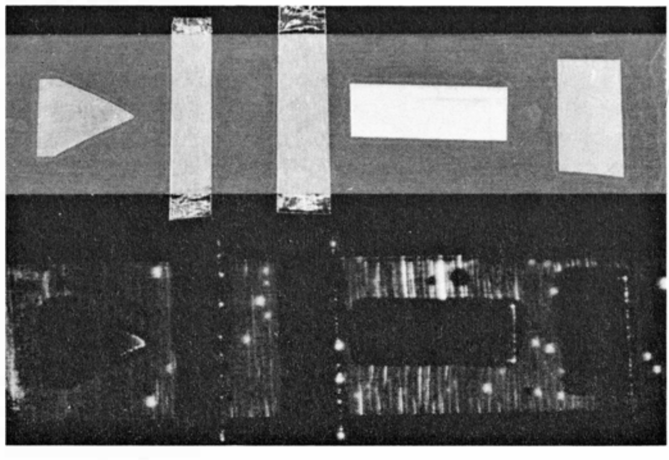
2. Efecto de variar la dirección del tirón



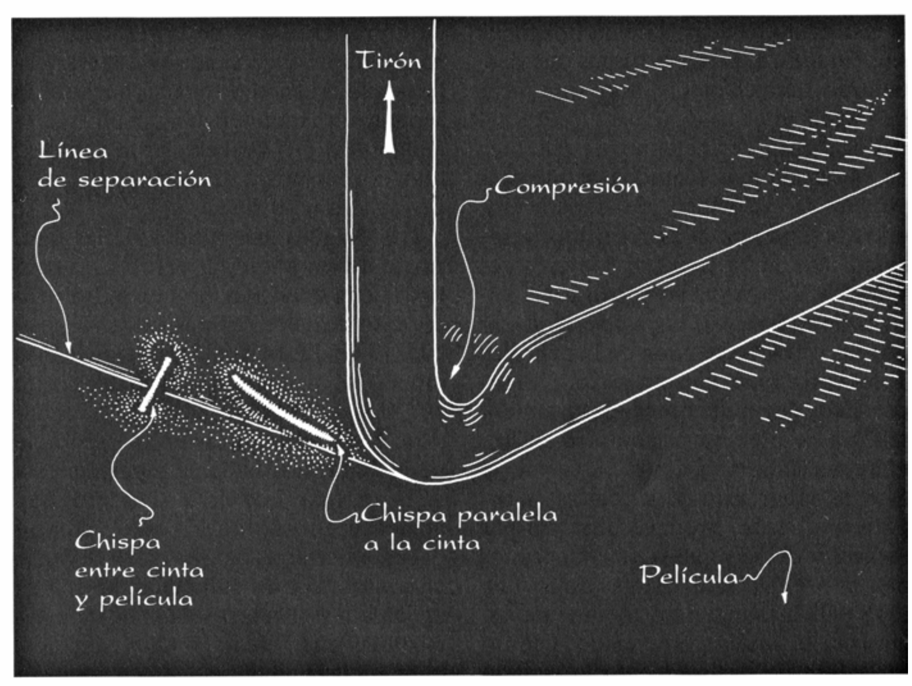
3. Efecto de aplicar presión a la mitad inferior de la cinta



4. Cinta con letras **(arriba)** *y el autógrafo de éstas* **(abajo)**



5. Cinta con pan de aluminio **(arriba)** *y el autógrafo de éste* **(abajo)**



6. Descarga producida por una cinta, cuando se arranca

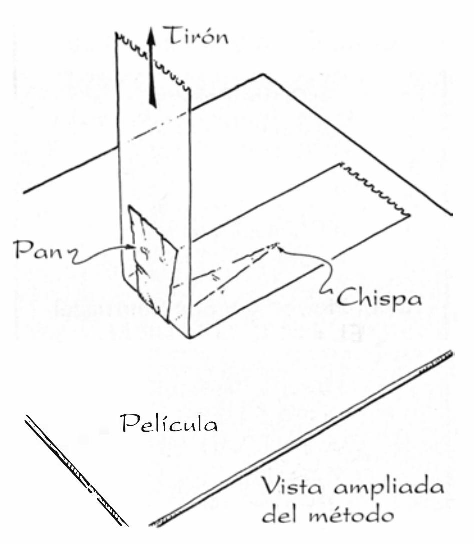
mismo, zonas que no chispean, con lo que se producen en la película zonas sin impresionar.

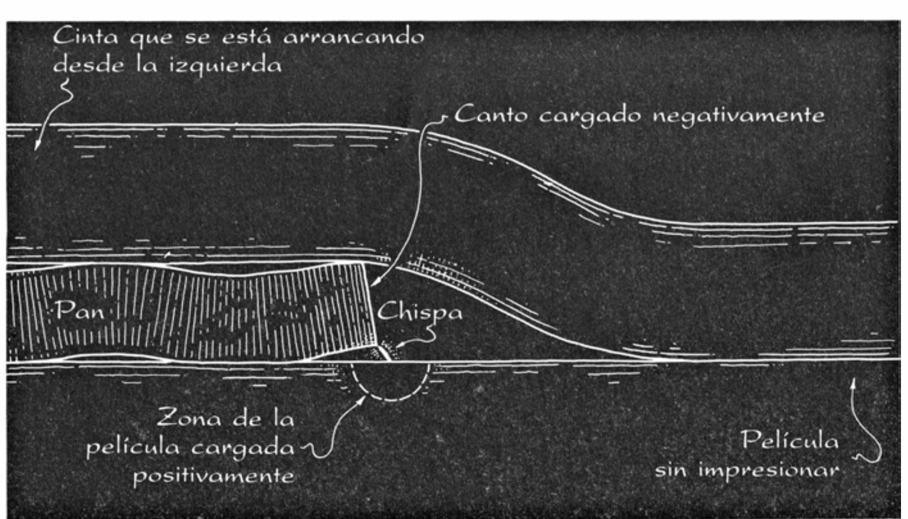
Durante una separación de adherencia-deslizamiento, la distancia entre las rayas depende de las propiedades del adhesivo, el soporte de éste y la superficie de la película. En este sentido, la rigidez de la cinta determina parcialmente la mecánica del modo en que su capa adhesiva se desprende de la película. Dickinson y Donaldson hicieron pruebas con cintas transparentes y fibrosas cuya rigidez se incrementó mediante una o dos capas de cinta aislante eléctrica adherida al soporte. Al arrancar una cinta así a una velocidad aproximadamente igual que en pruebas anteriores con cintas menos rígidas, la distancia entre las rayas se dobló hasta unos dos milímetros y decreció la intensidad de las chispas.

La distancia entre las rayas depende también de la dirección en que se tira de la cinta. Cuando el tirón es ascendente y vertical desde el plano de la película, las rayas están apretadas. Cuando el tirón corre paralelo al plano de la película, las rayas aparecen más separadas. En este caso, proliferan las chispas de gran intensidad, lo que viene a indicar que la deformación y fractura del adhesivo deben ser más rigurosas en ocasiones, y se crean así parches fuertemente cargados. Para conseguir el autógrafo que se muestra en la parte central izquierda de la figura 2, la cinta sufrió primero un tirón paralelo al plano de la película y luego un tirón ascendente y vertical.

La presión con la que se fija la cinta a la película influye en la magnitud de la formación de chispas. Cuando Dickinson y Donaldson adhirieron una tira de sus cintas transparentes a una película del tipo 107C, apretaron con firmeza la mitad inferior de la tira. Al arrancar la cinta, se produjeron en esa mitad inferior imágenes múltiples y brillantes [*véase la figura 3*]. A veces, la influencia de la presión puede verse sin una presión adicional debido a la manera en que la cinta transparente se despega de una superficie: el borde de la cinta flexiona inmediatamente antes de despegarse, comprimiendo su cara adherente. Esa adherencia más firme del borde antes de su separación aumenta la formación de chispas producidas en el curso de la separación; el autógrafo exhibe entonces un brillante trazado del borde de la cinta.

La ruptura de una cinta adhesiva y una superficie de separación se llama fallo adhesivo; por fallo cohesivo se entiende la ruptura de algún tipo de material aislado. El segundo produce normalmente unos parches cargados y unas formaciones de chispas bastante más débiles que los fallos adhesivos. Para corroborarlo, Dickinson y Donaldson descubrieron un procedimiento en virtud del cual conseguir que ambos tipos de fallo se dieran al arrancar una tira de cinta transparente. Comenzaron por pegar una capa de cinta de dos caras (o sea, engomada por las dos caras) a la película. Sobre la cinta pegaron tres letras, *W, S* y *U*, recortadas de la cinta transparente, con sus caras adhesivas hacia abajo. A continuación, pegaron una tira de cinta transparente a lo largo de la cinta de dos caras.





7. Descarga puntual entre pan de aluminio y una película

Cuando arrancaron la tira transparente de la cinta de dos caras, se produjeron ambos tipos de fallo. Allá donde la tira se arrancaba directamente de la cinta de dos caras, dicha tira sufría un fallo cohesivo, puesto que las superficies tenían la misma composición; donde se arrancaba del reverso de las letras, sufría un fallo adhesivo, puesto que las superficies eran de diferente composición.

Para impedir la aparición de luz adicional, despegaban la cinta de dos caras, poco a poco, a la vez que la humedecían con metanol aplicado con una escobilla de algodón. Cuando el metanol se colaba en la comisura entre la cinta y la película, eliminaba la formación de chispas y abría un camino a la conducción eléctrica, o bien destruía la ligazón adhesiva de la cinta con la película. Al revelar ésta, las letras aparecieron blancas sobre un fondo oscuro [*véase la figura 4*]. Por lo visto, el fallo adhesivo había producido chispas, mientras que el cohesivo apenas si las había provocado. Este resultado parece contradecir la intuición, ya que costaba más arrancar la cinta durante el fallo cohesivo, lo que incorrectamente sugiere que la formación de chispas debería ser más vigorosa.

Dickinson y Donaldson observaron que las huellas dactilares sobre el lado engomado de una cinta reducía la formación de chispas al arrancar una película. La grasa de los dedos reduce la adhesión de la cinta y puede, además, proporcionar un camino conductor que reduzca la posibilidad de que se produzca una descarga en el seno del gas que llena la comisura durante el arranque. (Las zonas no contaminadas sufrían una formación de chispas normal.) Análogamente, las chispas disminuían si se depositaba tinta con una pluma de punta de fieltro sobre el lado engomado de la cinta o sobre la emulsión de la película.

Cuando la cinta se arranca de la película, la distribución de parches cargados crea intensos campos eléctricos en la región de la comisura. Supóngase que entre la cinta y la película emparedamos un conductor metálico (verbigracia, pan de aluminio), de manera que lo arrastremos con la cinta al arrancar ésta. ¿Alterará la presencia del pan de aluminio la distribución de la carga y la subsiguiente formación de chispas? Dickinson y Donaldson emparedaron fragmentos de pan de aluminio entre cinta transparente y película [*véase la figura 5*] Cabría esperar que, al arrancar la cinta, la formación de chispas fuese normal, salvo allá donde hubiera metal; es decir que la ausencia de fallo adhesivo impidiera la formación de chispas, dejando una réplica en oscuro del contorno del pan en la copia revelada. Desde luego, la copia mostraba tales réplicas, pero cada una presentaba bandas luminosas muy curiosas, a lo largo del borde derecho (recuérdese que la separación se hace de izquierda a derecha) y, a veces, a lo largo de los bordes superior e inferior; en el borde izquierdo no se formaron bandas. Las bandas aparecían separadas del resto del autógrafo por una zona oscura, donde el espesor del pan había impedido que la cinta se adhiriera a la película.

¿Cuál es la causa de tales bandas? Cuando la separación llega al borde izquierdo de un trozo de pan, éste conduce parte de las cargas allí creadas. Por ejemplo, si el borde izquierdo recibe una afluencia de electrones, todo el pan se carga negativamente cuando los electrones se distribuyen por él. En los bordes, esa concentración de electrones es máxima, especialmente en las irregularidades más agudas que dejaron las tijeras al cortar el pan. Las zonas de la película situadas debajo mismo de los bordes del pan se cargan positivamente cuando parte de sus electrones se ven arrastrados por los electrones del pan. Se establece entonces un campo eléctrico entre los bordes y la película subyacente. Al adquirir dicho campo suficiente intensidad, una descarga lleva electrones a la película, a través del aire atrapado bajo el pan; la película y el pan se neutralizan. Conforme se va arrancando, se producen más chispas.

Si el borde derecho del pan se recorta en punta, será allí más intenso el campo eléctrico, porque las cargas se concentran en las puntas mejor que en los bordes rectos. Las chispas luminosas que así sobrevienen crean una banda brillante en la réplica de la punta que aparece en la película revelada. Para generar esa banda no es necesario que la separación llegue hasta la punta. ¿Cómo? Dickinson y Donaldson detuvieron la separación a siete milímetros de la punta en una porción triangular de pan. Luego, para impedir que siguieran formándose chispas, arrancaron el resto de la cinta humedeciéndola con metanol. Al revelar la película, una banda clara señalaba la punta de la copia del triángulo.

Se advierte la tendencia de la cinta adhesiva a emitir luz cuando se arranca de una superficie si procedemos así cerca de la antena de una radio de transistores sintonizada en alguna zona vacía de onda media. (La antena se encuentra posiblemente cerca de la parte superior de la radio.) La descarga provocada por la separación emite un ruido eléctrico de una intensidad más o menos proporcional a la luminosidad de las chispas. Arránquese la cinta aproximadamente un segundo después de haberla aplicado y luego pruébese con retardos mayores. ¿Varía el nivel de ruido? Pruébese con diferentes superficies y distintas velocidades de separación. ¿Capta la radio el ruido si está sintonizada en la banda FM? ¿Qué ocurre con el ruido si la cinta está rodeada de aire muy húmedo?

Sugerimos al lector que investigue la separación de cintas adhesivas bajo otras circunstancias. Por ejemplo, rocíese ligeramente con polvo metálico, polvo de licopodio o harina fina la cara engomada de la cinta antes de aplicarla a la película. ¿Se alteran los autógrafos? ¿Qué ocurre si emparedamos una malla metálica fina entre la cinta y la película? Podría resultar interesante estudiar las características de la separación de algunos materiales no adhesivos, tales como el plástico de envolver alimentos. Me agradaría tener noticias de los descubrimientos de los lectores.

Libros

Universidad de provincias, física de partículas y nuevos materiales

Luis Alonso, Eulogio Oset y Pere Molera

SCIENCE IN THE PROVINCES. SCIENTIFIC COMMUNITIES AND PROVINCIAL LEADERSHIP IN FRANCE, 1860-1930, por Mary Jo Nye. University of California Press; Berkeley, 1986. España, su vida cultural, se espejó en Francia a lo largo del siglo XIX y bastante del siguiente, aunque en esta vigésima centuria a intervalos. Asimismo, es un tópico afirmar que las repúblicas americanas, desgajadas del tronco hispano, se han alimentado, y siguen viviendo, de los patrones cortados en París. No se trata, evidentemente, de una fuente única, pero sí predominante. De ahí que el conocimiento de la historia de la ciencia francesa pueda enseñarnos a interpretar los pasos seguidos en nuestros países.

Mary Jo Nye, vicepresidenta de la History of Science Society, es especialista en la historia de la ciencia francesa, en particular, en el dominio de la física y la química. Años atrás había publicado en revistas especializadas distintos capítulos de lo que hoy se nos ofrece como una obra unitaria. El libro, pues, llega con la decantación de la obra meditada y sus juicios, nítidos y contundentes, han conocido antes el troquel y la contrastación de la comunidad experta.

El volumen está dedicado al desarrollo de la ciencia en las "provincias", es decir, en las universidades de Nancy, Grenoble, Toulouse, Lyon y Bordeaux, en contraposición a la de París, que constituye el telón de fondo más o menos definido. (Para completar la geografía, el lector podría consultar los trabajos de Terry Shin sobre las facultades de ciencias de Lyon, Montpellier y Besançon; de Harry W. Paul sobre las universidades católicas fancesas, y de Robert Fox sobre las *sociétés savantes.*)

La razón del intervalo temporal escogido (1860-1930), y su entronque en el desarrollo de la institución de la enseñanza superior francesa, los expone en un primer capítulo introductorio consagrado a la ciencia en la universidad gala antes de la primera guerra mundial. No se pierde la autora en antecedentes remotos, sino que comienza su narración en los años del Terror. Analiza luego, en sendos capítulos, los centros indicados para concluir recapitulando el carácter y los logros de la ciencia en provincias. Prolonga las peculiaridades de cada universidad en una figura señera de la misma: Nancy y René Blondlot, Grenoble y François Raoult, Toulouse y Paul Sabatier, Lyon y Victor Grignard, Bordeaux y Pierre Duhem. De cuya mera enumeración se desprende ya el énfasis de la autora en los cultivadores de la física y la química. Ese sesgo es uno de los puntos discutibles de la obra.

Por decirlo brevemente, nos hallamos ante una valoración de la universidad napoleónica alejada, en lo posible, de su epicentro: París. A grandes rasgos, llámase universidad napoleónica al modelo de centro superior de estudios de un país cuyos estatutos, plan de estudios, titulaciones, estructura del profesorado y nombramiento de los cargos rectores dependen del ministerio de educación. De acuerdo con esa concepción, se prima la universidad de la capital (la "universidad central"), donde se hallan todas las facultades y escuelas superiores, a cuya imagen pueden crearse algunas en las universidades de provincias. Determinados grados y títulos sólo se podrán recibir en la capital; su ligazón con el poder político es obvia.

La "provincial" aquí no es sinónimo de "provinciano", al menos en líneas generales. Ni siquiera en su relación inmediata con el progreso económico (agrícola e industrial) del medio. Imbricada en la geografía y auxiliada con el soporte del municipio o mecenas de la región, esa universidad, de segundo rango en el papel administrativo, conoce mayores grados de libertad ante las nuevas ideas y nuevas aplicaciones del conocimiento científico que la "central", anquilosada en el saber oficial y servil del poder en muchos casos.

Las leyes –retribuciones más altas– y el prestigio favorecían la apetencia de las cátedras de la capital. Pero, en no pocas ocasiones, los lazos familiares o el apego al terruño determinó que las mejores cabezas se quedaran en las provincias y formaran escuelas sólidas. Cierto es que las limitadas proporciones del centro provocaban a veces rencillas de campanario. Pero no lo era menos que los ministros republicanos y socialistas, más centralistas y sectarios que sus predecesores, cerraban las universidades privadas, situaban a los suyos en puestos clave e impedían el ascenso de los discrepantes. (Paul Sabatier, premio Nobel de química en 1912, vio cómo se le negaba, por su catolicismo practicante, el decanato de ciencias en Toulouse.)

Nye cree que un factor del despliegue universitario de las regiones fue el desarrollo experimentado contemporáneamente por el enemigo del norte, la universidad alemana. Otros, su atención a la ciencia aplicada y su capacidad de abrirse a alumnos extranjeros. No entiende, sin embargo, la endogamia –el chauvinismo lo llama ella– que impide la savia aportada por profesores foráneos. Su libro, que puede leerse con falsilla española, me ha recordado, por dar un ejemplo, el *Discurso que en la inauguración de los Estudios Generales establecidos en la ciudad de Barcelona por su Excmo. Ayuntamiento, con aprobación del Señor Jefe Político de la Provincia leyó el Dr. D. Alberto Pujol... en 19 de noviembre de 1836* (Barcelona, 1836): "Compañeros, siempre que el árbol del saber profundice sus raíces en esta tierra que ha germinado tantos literatos, a su sombra descansará tranquilo el ciudadano libre [p. 3] [...] Las ciencias naturales capaces por sí de satisfacer el entendimiento, cuyas verdades profundas, llenas y abstractas son el verdadero alimento del alma, se difundirán con ventaja de la sociedad a beneficio de las importantes lecciones de los Profesores que conocen bien el estado actual de los programas científicos, y aspiran a ponernos al nivel de las naciones más cultas; y a manera que la sangre circula por las venas del cuerpo humano, los conocimientos positivos circularán por el cuerpo social, para dar vida y movimiento a la agricultura, al comercio y a las artes...". (pp. 5-6). (L. A.)

PARTICULAS E INTERACCIONES. "DE RERUM NATURA", por Pedro Pascual. Universitat de València; Valencia, 1987. Con motivo de su reciente investidura como doctor honoris causa por la Universidad de Valencia, el profesor Pascual nos ofrece un valioso resumen de la historia, evolución y estado actual de la física subnuclear. Con un estilo muy diferente del que tiene

acostumbrado a los lectores de su libro sobre mecánica y cromodinámica cuánticas y su centenar largo de publicaciones científicas, en este caso hace un repaso cualitativo del esfuerzo de la comunidad científica por comprender el fascinante mundo de las partículas elementales y sus interacciones.

Dirigido a un público general, el libro requiere, no obstante, cierta atención para su seguimiento, aunque no presupone conocimientos avanzados de física. El autor nos guía con habilidad desde la prehistoria de las partículas elementales, en el mundo griego, hasta los últimos descubrimientos experimentales, los bosones $W^{\pm}$ y Z^{o}, mediadores de la interacción electrodébil que unifica las interacciones electromagnéticas y las débiles, y la explosión de la supernova 1987 A, que ha dado lugar al nacimiento de la astrofísica de neutrinos.

Gradualmente va conduciéndonos por los pilares de la moderna teoría de partículas elementales, introduciéndonos en el campo de la electrodinámica cuántica, que estudia el fenómeno de la interacción de fotones y electrones, aprovechando el tema para presentar los conceptos fundamentales de teoría cuántica de campos, que se usarán en el resto del libro. Hace luego una incursión en el mundo de los leptones y de los hadrones, con sus peculiares simetrías. Aborda los quarks, constituyentes elementales de los hadrones, y los conceptos de aroma y color, que sirven para identificar a aquéllos. Sigue con las interacciones entre los quarks, a través de la teoría de cromodinámica cuántica, sacándole punta a las analogías y señalando las diferencias con la electrodinámica cuántica. Describe la teoría electrodébil, que unifica las interacciones débiles con las electromagnéticas, y expone los métodos utilizados para unificar esta teoría con la de las interacciones fuertes, para concluir recordando los últimos avances en los dominios de las supersimetrías, supergravedad y supercuerdas, sin olvidar la esperanza de obtener una descripción adecuada del campo gravitatorio y de la unificación de todas las interacciones.

El libro ofrece, al propio tiempo, un amplio panorama de la situación presente y la interconexión entre las diferentes parcelas de ese amplio campo de investigación, por lo que es de lectura útil para físicos no especialistas, que pueden encontrar las ideas y los propósitos de esa jungla de conceptos, expuestos de una manera clara y unificada. Por otra parte, los especialistas del campo, normalmente interesados en alguna subrama, podrán asimismo apreciar la panorámica general, al igual que la labor historiográfica del autor en su recorrido por los inicios y evoluciones de cada uno de los temas fundamentales hasta hoy. (E. O.)

NUEVOS MATERIALES: LOS VIDRIOS METÁLICOS, por Antonio Hernando Grande. Madrid; editorial Eudema, 1987. Ediciones de la Universidad Complutense, S.A., ha editado este libro, dentro de la serie "Temas de la Física de hoy", como texto de apoyo para estudiantes e investigadores interesados en la ciencia de los materiales. La obra es fruto de la labor docente e investigadora de A. Hernando, catedrático de dicho centro superior.

Casi el setenta por ciento de los elementos químicos de la tabla periódica son metales. Si bien es verdad que algunos metales se han venido utilizando desde la antigüedad, como es el caso del cobre, oro, bronce, etcétera, también es cierto que cada día se descubren nuevas e importantes aleaciones. El continuo indagar acerca de la naturaleza y de la estructura de los metales y aleaciones ha generado un gran cúmulo de conocimientos en este ámbito. Conocimientos que permiten a la técnica disponer de medios adecuados para obtener nuevos y sorprendentes materiales y modificar las propiedades de estos metales y aleaciones por procedimientos químicos, físicos y mecánicos.

El método del enfriamiento ultrarrápido, descubierto por Duwez en 1960, consiste en fundir una aleación y dejarla caer, a cierta presión y en forma de un fino chorro de líquido, sobre la superficie metálica de una rueda girando a gran velocidad, que actúa de sumidero de calor solidificando el metal en forma de cinta. Este método de enfriamiento ha permitido obtener materiales difíciles de ser encuadrados en la convencional clasificación de los estados de la materia. Entre ellos merecen ser indicados los vidrios metálicos con orden de largo alcance en escala inferior a los 20 angstrom, las aleaciones microcristalinas con un margen de 0,1, los cuasicristales con simetría local de orden 5 que es incompatible con la periodicidad traslacional y los compuestos metálicos ("composites"), en los que coexisten fases amorfas y microcristalinas. Metales amorfos también se obtienen por deposición química a partir de una disolución iónica, por ejemplo de níquel, en contacto con una superficie de acero.

La aparición de estos materiales ha supuesto un desafío a la metalurgia y a la físico-química de sólidos, pero al mismo tiempo ha despertado un notable interés gracias a sus sorprendentes propiedades, codiciadas por la técnica.

Los metales amorfos, o vidrios metálicos, son aislantes eléctricos, pues la conductividad eléctrica de los metales convencionales es debida a la estructura cristalina y al peculiar tipo de enlace entre los átomos en esta disposición. Pero la resistividad eléctrica de estos vidrios es función del porcentaje de carácter amorfo de estos metales, lo que abre un gran abanico de posibilidades en aplicaciones eléctricas de dichos materiales. Los vidrios metálicos ofrecen mayor resistencia a la corrosión que los metales cristalinos: en el caso del cromo, 10^5 veces. El límite de rotura de los cristales amorfos es también muy superior al de los metales cristalinos. En los fenómenos de la magnetostricción, alargamiento o acortamiento en la dirección de la imanación espontánea, el coeficiente de acoplamiento magnetoelástico, definido como el cociente entre la energía elástica almacenada y el trabajo de imanación suministrado, es máximo en los materiales amorfos. El comportamiento magnético de los vidrios metálicos suele ser más duro que el de los metales convencionales. Las pérdidas energéticas de la chapa magnética se reducirían cien veces utilizando vidrios metálicos, lo que representaría un ahorro de billones de pesetas por año.

El libro, después de una resumida pero interesante introducción, se inicia explicando qué son los sólidos amorfos y qué tipo de amorfos son los vidrios metálicos. Seguidamente se describen las principales propiedades y aplicaciones de estos nuevos materiales. A continuación se estudian los fundamentos de la obtención y la técnica del enfriamiento ultrarrápido para la producción de los vidrios metálicos. Después se analizan, con rigor científico y con claridad pedagógica, las distintas teorías actuales sobre la estructura de los vidrios metálicos; es decir, órdenes de largo y de corto alcance, la función de distribución radial, orden topológico y orden químico de corto alcance, los diferentes modelos de estructuras, la construcción de modelos, contraste de los modelos con los resultados experimentales... Con estos conocimientos se está en condiciones de discutir la influencia de la relajación estructural en las propiedades de los vidrios metálicos, lo que constituye el objetivo del penúltimo capítulo del libro. El texto termina dedicando un capítulo a estudiar en profundidad la magnetoelasticidad de los metales amorfos. (P. M.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

EL H.M.S. *WARRIOR*

The Black Battlefleet. G. A. Ballard. The Nautical Publishing Co., 1980.

Warrior: The First Modern Battleship. Walter W. Brownlee. Cambridge University Press, 1985.

FLUCTUACIONES EN PROCESOS NATURALES

Stochastic Processes in Physics and Chemistry. N. G. Van Kampen. North Holland; 1981.

Noise Induced Transitions. Theory and Applications in Physics, Chemistry, and Biology. W. Horsthemke y R. Lefever. "Springer Series in Synergetics." Springer Verlag, 1983.

Noise in Nonlinear Dynamical Systems. F. Moss y P.V.E. McClintock. Cambridge University Press, 1988.

LAGARTIJAS UNISEXUALES: UN MODELO DE EVOLUCION CEREBRAL

Female of the Species: Sex and Survival in the Animal Kingdom. Bettyann Kevles. Harvard University Press, 1986.

Evolution of Mechanisms Controlling Mating Behavior. David Crews y Michael C. Moore en *Science*, vol. 231, n.º 4734, págs. 121-125; 10 de enero de 1986.

Behavioral Facilitation of Reproduction in Sexual and Unisexual Whiptail. Lizards. David Crews en *proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 83, n.º 24, págs. 9547-9550; diciembre, 1986.

The Psichology of Reproductive Behavioir: An Evolutionary Perspective. David Crews. Prentice-Hall, Inc., 1987.

CUERDAS COSMICAS

Evolution of Cosmic Strings. A. Albrecht y N. Turok en *Physical Review Letters*, volumen 54, número 6, páginas 1868-1871; 22 de abril de 1985.

Cosmic Strings and Domain Walls. Alexander Vilenkin en *Physics Reports*, vol. 121, n.º 5, págs. 263-315; mayo, 1985.

Superconducting Cosmic Strings. E. M. Chudnovsky, G. B. Field, D. N. Spergel y A. Vilenkin en *Physical Review D*, vol. 34, n.º 4, págs. 944-950; 15 de agosto de 1986.

COMPUTACION CONJUNTA EN CIRCUITOS NEUROMORFOS

Computing with Neural Networks. Dirigido por John Denker. American Institute of Physics, 1986.

Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. Dirigido por David E. Rumelhart, James L. McClelland y el PDP Research Group. The MIT Press, 1986.

Computing with Neural Circuits: A Model. J. J. Hopfield y D. W. Tank en *Science*, volumen 233, número 4764, páginas 625-633; 8 de agosto de 1986.

PALEOMAGNETISMO LUNAR

Convection in the Moon and the Existence of a Lunar Core. S. K. Runcorn en *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, vol. 296, n.º 1446, págs. 270-284; 1967.

Primeval Displacements of the Lunar Pole. S. K. Runcorn en *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, vol. 29, n.º 2, págs. 135-147; agosto, 1982.

Lunar Magnetism, Polar Displacements and Primeval Satellites in the Earth-Moon System. S. K. Runcorn en *Nature*, vol. 304, n.º 5927, págs. 589-596; 18 de agosto de 1983.

The Primeval Axis of Rotation of the Moon. S. K. Runcorn en *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, vol. 313, n.º 1524; págs. 77-83; 27 de noviembre de 1984.

MOVIMIENTO DE LAS CELULAS ANIMALES

The Locomotion of Fibroblasts in Culture. III. Movements of Particles on the Dorsal Surface of the Leading Lamella. M. Abercrombie, Joan E. M. Heaysman y Susan M. Pegrum en *Experimental Cell Research*, vol. 62, n.ºs 2-3, págs. 389-398; octubre, 1970.

Redistribution and Pinocytosis of Lymphocyte Surface Immunoglobulin Molecules Induced by Anti-Immunoglobulin Antibody. Roger B. Taylor, W. Philip H. Duffus, Martin C. Raff y Stefanello de Petris en *Nature New Biology*, vol. 233, n.º 42, págs. 225-229; 20 de octubre de 1971.

The Crawling Movement of Metazoan Cells. M. Abercrombie en *Proceedings of the Royal Society of London, Series B*, vol. 207, n.º 1167, págs. 129-258; 29 de febrero de 1980.

Membrane Recycling by Coated Vesicles. Barbara M. F. Pearse y Mark S. Bretscher en *Annual Review of Biochemistry*, vol. 50, págs. 85-101; 1981.

Endocytosis: Relation to Capping and Cell Locomotion. Mark S. Bretscher en *Science*, vol. 224, n.º 4650, págs. 681-686; 18 de mayo de 1984.

FRACTURA DEL VIDRIO

Slow Fracture Model Based on Strained Silicate Structures. T. A. Michalske y B. C. Bunker en *Journal of Applied Physics*, vol. 56, n.º 10, págs. 2686-2693; 15 de noviembre de 1984.

Closure and Repropagation of Healed Cracks in Silicate Glass. Terry A. Michalske y E. R. Fuller, Jr., en *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 68, n.º 11, págs. 586-590; noviembre, 1985.

JUEGOS DE ORDENADOR

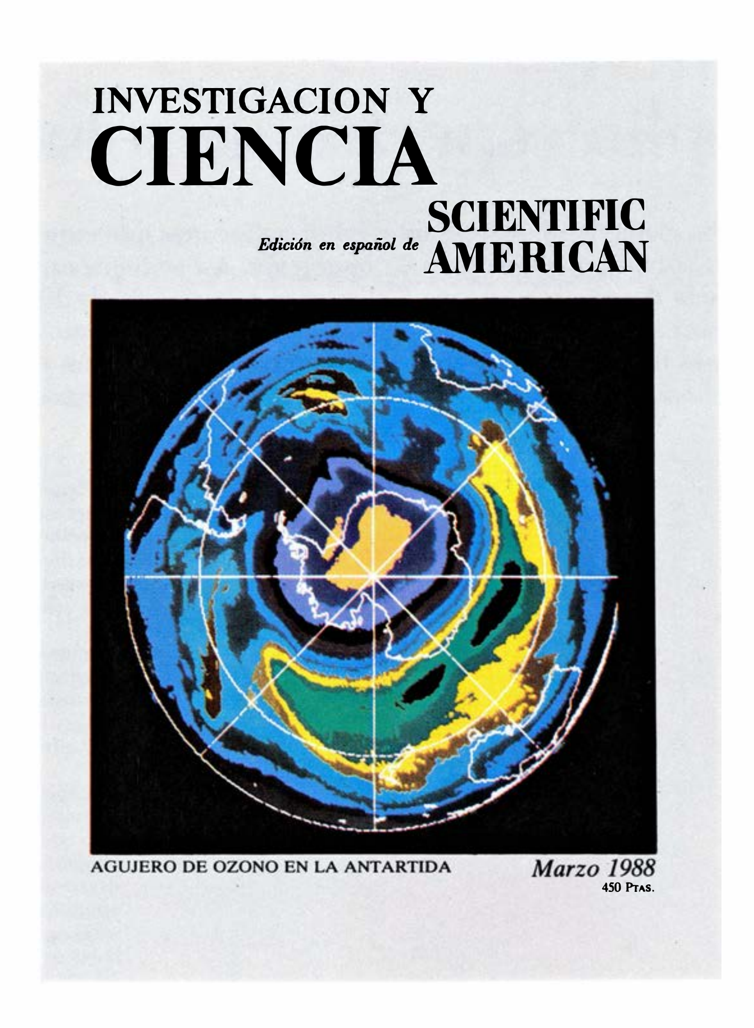
Mots d'Heures: Gousses, Rames. The d'Antin Manuscript. Luis d'Antin van Rooten. Penguin Books, 1980.

TALLER Y LABORATORIO

Fracto-emission from Polymers, Crystals, and Interfaces. J. T. Dickinson y L. C. Jensen en *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, vol. 743, págs. 68-75; enero, 1987.

Autographs from Peeling Pressure Sensitive Adhesives: Direct Recording of Fracture-induced Photon Emission. J. T. Dickinson y E. E. Donaldson en *The Journal of Adhesion*, vol. 24, n.ºs 2-4, págs. 199-200; diciembre, 1987.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



EL AGUJERO ANTARTICO DE OZONO, por Richard S. Stolarski
La aparición de un agujero estacional de ozono en la capa estratosférica que absorbe la mayor parte de la radiación ultravioleta procedente del Sol sugiere un posible adelgazamiento de este estrato.

CELULAS ASESINAS, por John Ding-E Young y Zanvil A. Cohn
Los linfocitos asesinos atacan, a las órdenes del sistema inmunitario, las células tumorales y las que han sufrido infección por virus. Su estudio quizá redunde en beneficio de las terapias del cáncer y del SIDA.

REALIDAD DEL MUNDO CUANTICO, por Abner Shimony
¿Qué es el fotón, una partícula o una onda? Según la mecánica cuántica, depende del modo de observación. Se ha demostrado que esa paradoja, que desconcierta al profano, es correcta.

PECES INTERMAREALES, por Michael H. Horn y Robin N. Gibson
El desarrollo de sorprendentes adaptaciones, como son la tolerancia a la deshidratación o la capacidad de respirar aire, posibilitan la supervivencia en el punto de confluencia del agua y la tierra.

PLASTICIDAD SINAPTICA, por Manuel Nieto Sampedro
Cambios en el número, tipo y función de las conexiones del sistema nervioso son fundamentales para la adaptación de los organismos superiores.

TIERRAS MENOS RARAS, por Gunter K. Muecke y Peter Möller
Se trata de elementos metálicos que se encuentran en pequeñas concentraciones en la mayoría de los minerales y cuya abundancia relativa informa de la geoquímica de los magmas y de las soluciones hidrotermales.

ARTE, ILUSIONES Y SISTEMA VISUAL, por Margaret S. Livingstone
Color, forma y movimiento se procesan de modo independiente en estructuras oculares y cerebrales distintas y se reúnen para generar la experiencia que denominamos percepción.

EL TRANSFORMADOR, por John W. Coltman
Inventado a mediados del siglo pasado, permite convertir la corriente eléctrica que sale del generador en una forma de energía apta para transportarla a larga distancia y aprovecharla en múltiples condiciones distintas.

